

**LAPORAN AKHIR
PENELITIAN STRATEGIS NASIONAL TAHUN KE-2
TAHUN ANGGARAN 2014**



Judul : Rancang Bangun Sistem Pahat Putar Modular (*Modular Rotary Tool System*) Untuk Pemesinan Material Alat Kesehatan Ortopedik (*Titanium Alloy*)

Ketua : Dr. Eng. Suryadiwansa Harun (NIDN. 0001057002)

Anggota : 1. Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin (NIDN. 0006056402)
2. Dr. Gusri Akhyar Ibrahim (NIDN. 0017087103)
3. dr. M Ricky Ramadhan (NIDN. 0015068301)

Dibiayai oleh Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, sesuai dengan Surat Perjanjian Pelaksanaan Penugasan Penelitian Strategis Nasional Nomor : 297/UN26/8/PL/2014

Lembaga Penelitian
Universitas Lampung
2014

HALAMAN PENGESAHAN

Judul Kegiatan : Rancang Bangun Sistem Pahat Putar Modular (Modular Rotary Tool System) untuk Pemessinan Material Alat Kesehatan Ortopedik (Titanium Alloy)

Peneliti / Pelaksana

Nama Lengkap : Dr.Eng. SURYADIWANSa HARUN

NIDN : 0001057002

Jabatan Fungsional :

Program Studi : Teknik Mesin

Nomor HP : 082181019857

Surel (e-mail) : suryadiwansa.harun@eng.unila.ac.id

Anggota Peneliti (1)

Nama Lengkap : Dr.Ir YANUAR BURHANUDDIN

NIDN : 0006056402

Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Anggota Peneliti (2)

Nama Lengkap : Dr. GUSRI AKHYAR IBRAHIM

NIDN : 0017087103

Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Anggota Peneliti (3)

Nama Lengkap : dr. M RICKY RAMADHIAN

NIDN : 0015068301

Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Institusi Mitra (jika ada)

Nama Institusi Mitra :

Alamat :

Penanggung Jawab :

Tahun Pelaksanaan : Tahun ke 2 dari rencana 3 tahun

Biaya Tahun Berjalan : Rp. 85.000.000,00

Biaya Keseluruhan : Rp. 266.600.000,00



Mengetahui
Wakil Dekan I FT

(Dr.Eng. Helmy Fitriawan)

NIP/NIK 197509282001121002

Bandar Lampung, 27 - 11 - 2014,

Ketua Peneliti,

(Dr.Eng. SURYADIWANSa HARUN)

NIP/NIK 197005012000031001

Menyetujui,
Ketua Lembaga Penelitian Unila

(Dr. Eng. Admi Syarif)

NIP/NIK 196701031992031003

RINGKASAN

Saat ini negara kita masih sangat tergantung terhadap produk alat kesehatan asal impor, dimana salah satunya adalah peralatan kesehatan ortopedik (*orthopedic*) implan. Peralatan kesehatan ortopedik umumnya terbuat dari material titanium dan paduannya, karena material ini mempunyai karakteristik tahan terhadap korosi bila bereaksi dengan cairan dan jaringan tubuh sehingga tidak menghasilkan sel logam beracun atau unsur-unsur yang memicu alergi pada tubuh manusia oleh karena itu logam ini dapat diterima oleh tubuh (*bio-compatible*). Selain itu material ini mempunyai kekuatannya tinggi serta massanya yang ringan oleh sebab itu sangat sesuai untuk menggantikan peralatan kesehatan orthopedik yang terbuat dari baja (*steel*) yang mempunyai kekuatan yang lebih rendah dan bobot yang berat yang membebani tulang. Akan tetapi, titanium dan paduannya juga dikenal sebagai material yang mempunyai sifat ketermesinan yang rendah (*low machineability*) atau sulit dimesin. Selama ini pembuatan peralatan kesehatan ortopedik dilakukan dengan pemesinan dengan *Electron Discharge Machine* (EDM) dan pahat Diamond yang mahal. Untuk menjawab kesulitan dan mahalnya pemesinan alat kesehatan ortopedik bermaterial titanium, maka pada penelitian ini akan diterapkan suatu metode pemesinan baru yaitu dengan penerapan **sistem pahat putar modular**.

Pada penelitian tahun kedua (2014) ini telah dilakukan beberapa rangkaian penelitian. Pertama, pencarian parameter pemesinan optimum untuk material titanium ortopedik menggunakan model yang dibuat pada penelitian tahun pertama. Kedua, melakukan perancangan pemegang pahat putar (*rotary tool holder*) sistem modular. Ketiga adalah menilai (*assesment*) keamanan desain (aspek kekuatan rancangan, dan daya tahan terhadap defleksi) pemegang pahat putar menggunakan perangkat lunak *Finite Element Analysis*. Keempat adalah membuat cetak biru pemegang pahat putar sistem modular untuk keperluan pabrikasi (manufaktur). Dan kelima adalah pengujian peralatan kesehatan ortopedik yang sudah dipabrikasi, yaitu meliputi pengujian *run out* dan getaran. **Hasil utama yang diperoleh pada tahun kedua ini adalah purwarupa peralatan sistem pahat putar modular untuk pemesinan alat kesehatan ortopedik implan titanium, dimana peralatan ini mempunyai *run out* yang relatif kecil yaitu maksimum sekitar 0.1mm, serta getarannya pada kecepatan putar pahat maksimum, 2000 RPM adalah relatif rendah yaitu hanya sekitar 29Hz. Ini menunjukkan bahwa struktur pahat putar modular ini mempunyai sifat kekakuan yang tinggi. Juga, nilai getaran ini sangat kecil dari nilai ambang batas yang diijinkan, yaitu 4kHz. Oleh karena itu, peralatan sistem pahat putar modular ini dapat menjamin kepresisian dalam pemesinan atau pembuatan alat kesehatan ortopedik bermaterial titanium.**

Luaran penelitian ini baik tahun pertama dan kedua adalah publikasi pada **Jurnal Internasional Advanced Manufacturing Technology**, dengan judul paper adalah "**An Experimental Investigation of Effects of Tool Rotational Speed on Chip Deformation during Turning with Actively Driven Rotary Tool (*under review*)**" dan pada jurnal internasional yaitu **Key Engineering Material** atau **Applied Mechanics and Materials (AMM)** dengan judul paper adalah **FEM Simulation of Machining AISI 1045 Steel Using Driven Rotary Tool (*submitted*)**. Selain itu luaran yang lain adalah **purwarupa (*prototype*)** sistem pahat putar modular yang dapat **dipatenkan** dan digunakan oleh industri manufaktur logam dalam negeri untuk memproduksi peralatan kesehatan ortopedik bermaterial titanium alloy sehingga dapat mengurangi ketergantungan terhadap produk impor peralatan tersebut.

PRAKATA

Syukur Alhamdulillah penelitian dan laporan kemajuan penelitian hibah strategis nasional mengenai Rancang Bangun Sistem Pahat Putar Modular (*Modular Rotary Tool System*) Untuk Pemesinan Material Alat Kesehatan Ortopedik (*Titanium Alloy*) ini dapat terlaksana dan tersusun. Penelitian ini merupakan rintisan bagi pengembangan sistem pemesinan turning dengan pahat berputar untuk aplikasi pemotongan *difficult to cut material* yang sangat sulit untuk dipotong tapi. Pemesinan jenis material ini merupakan suatu tantangan untuk diatasi karena aplikasinya sangat berguna diberbagai bidang misalnya bidang kesehatan ortopedik. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memenuhi standard penelitian baik dari segi metodologi maupun mekanismenya, sehingga dapat dimanfaatkan oleh industri manufaktur logam dalam memproduksi peralatan kesehatan ortopedik bermaterial titanium alloy. Juga dengan kemandirian memproduksi peralatan kesehatan ortopedik bermaterial titanium alloy ini maka pemerintah dapat mengurangi devisa akibat pengurangan impor peralatan kesehatan ortopedik. Tidak lupa terima kasih kepada Direktorat Litabmas DIKTI yang telah mendanai penelitian ini sehingga penelitian ini terlaksana.

Bandarlampung, 25 Nopember 2015

Peneliti

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PENGESAHAN	1
RINGKASAN	2
PRAKATA	3
DAFTAR TABEL	5
DAFTAR GAMBAR	6
DAFTAR LAMPIRAN	7
BAB I. PENDAHULUAN	8
1.1. Latar Belakang	8
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1. Titanium Sebagai Material Peralatan Kesehatan Implant	10
2.2. Pemesinan Peralatan Kesehatan Ortopedik Bermaterial Titanium	11
2.3. Pemesinan dengan Sistem Pahat Berputar (<i>Rotary Tool System</i>)	12
2.4. Simulasi dan Eksperimental Pemesinan Turning dengan Pahat Berputar	14
BAB III. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN	35
BAB VI. METODE PENELITIAN	36
4.1 Waktu dan Tempat Penelitian	36
4.2 Tahapan Penelitian	36
4.3 Keluaran Penelitian	39
BAB V. HASIL YANG DICAPAI	40
5.1 Pencarian Parameter Optimum Pemesinan Material Titanium Ortopedik dengan Sistem Pahat Putar	40
5.2 Perancangan Pemegang Pahat Putar (<i>Rotary Tool Holder</i>) Modular	50
5.3 Pabrikasi dan Pengujian Sistem Pahat Putar Modular	54
BAB VI. RENCANA TAHAPAN BERIKUTNYA	60
BAB 7. KESIMPULAN DAN SARAN	62
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN	
I. Publikasi Ilmiah	

DAFTAR TABEL

		Halaman
Tabel 1	Parameter pemesinan yang dilibatkan dalam proses simulasi	20
Tabel 2	Parameter Jenis dan Geometri Material yang terlibat dalam proses simulasi	20
Tabel 3	Sifat mekanik dan termal serta kondisi batas dalam proses simulasi	21
Tabel 4	Pengujian kecepatan putar pahat terhadap suhu pemesinan (Kondisi pemesinan: $V_w=150$ m/min, $f=0.2$ mm/rev, $a = 1$ mm, $i = 0$, $\theta = 0$, dan tanpa cairan pendingin)	24
Tabel 5	Pengujian kecepatan putar pahat terhadap gaya potong utama (Kondisi pemesinan: $V_w=80$ m/min, $f=0.2$ mm/rev, $a = 0.5$ mm, $i = 0$, $\theta = 0$, dan tanpa cairan pendingin)	24
Tabel 6	Kondisi Pemotongan	26
Tabel 7	Pengujian experimental pengaruh kecepatan putar pahat terhadap suhu pemesinan (Kondisi pemesinan: $V_w=150$ m/min, $f=0.2$ mm/rev, $a = 1$ mm, $i = 0$, $\theta = 0$, dan tanpa cairan pendingin)	30
Tabel 8	Pengujian experimental pengaruh kecepatan putar pahat terhadap gaya potong (Kondisi pemesinan: $V_w=80$ m/min, $f=0.2$ mm/rev, $a = 0.5$ mm, $i = 0$, $\theta = 0$, dan tanpa cairan pendingin)	30
Tabel 9	Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen pengujian pengaruh kecepatan putar pahat terhadap suhu pemesinan (Kondisi pemesinan: $V_w=150$ m/min, $f=0.2$ mm/rev, $a = 1$ mm, $i = 0$, $\theta = 0$, dan tanpa cairan pendingin)	31
Tabel 10	Pengujian kecepatan putar pahat terhadap gaya potong utama (Kondisi pemesinan: $V_w=80$ m/min, $f=0.2$ mm/rev, $a = 0.5$ mm, $i = 0$, $\theta = 0$, dan tanpa cairan pendingin)	31

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1	8
Gambar 2	11
Gambar 3	12
Gambar 4	12
Gambar 5	13
Gambar 7	15
Gambar 8	15
Gambar 9.	18
Gambar 10	19
Gambar 11	19
Gambar 12	21
Gambar 13	22
Gambar 14	23
Gambar 15	23
Gambar 16	26
Gambar 17	27
Gambar 18	28
Gambar 19	29
Gambar 20	32
Gambar 21	33
Gambar 22	38
Gambar 23	41
Gambar 24	44
Gambar 25	44
Gambar 26	48
Gambar 27	49
Gambar 28	51
Gambar 29	52
Gambar 30	53
Gambar 31	53
Gambar 32	54
Gambar 33	55
Gambar 34	55
Gambar 35	56
Gambar 36	57
Gambar 37	58
Gambar 38	59

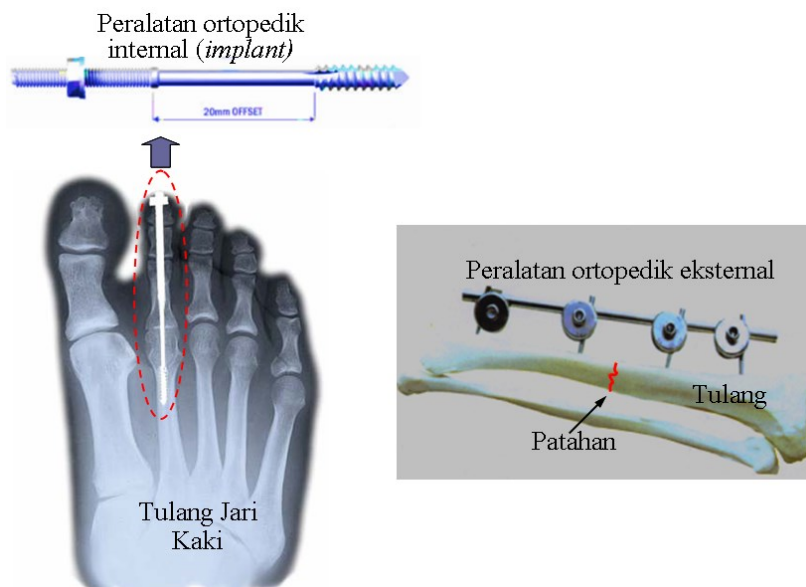
DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Jurnal International Advanced Manufacturing Technology (*under review*), dengan judul paper adalah "**An Experimental Investigation of Effects of Tool Rotational Speed on Chip Deformation during Turning with Actively Driven Rotary Tool**"
- Lampiran 2 Seminar SNTTM 2014 / Jurnal International Key Engineering Materials (*submitted*), dengan judul paper adalah "**FEM Simulation of Machining AISI 1045 Steel Using Driven Rotary Tool**"

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Saat ini negara kita masih sangat tergantung terhadap produk peralatan kesehatan asal impor. Data Kementerian Perdagangan Nasional Republik Indonesia menunjukkan bahwa nilai perdagangan peralatan kesehatan rata-rata 5 (lima) trilyun rupiah setiap tahun, dimana nilai perdagangan itu didominasi oleh perdagangan produk impor, dimana 80% dari nilai perdagangan itu berasal dari perdagangan produk impor [Kementerian Perdagangan, 2008] [1]. Salah satu peralatan kesehatan yang masih tergantung terhadap produk asal impor adalah peralatan ortopedik (orthopaedic). Peralatan kesehatan ortopedik biasanya ditanam (implant) dalam tubuh pasien yang berfungsi untuk menggantikan sendi akibat cacat bawaan, cider karena olahraga atau cedera serius karena kecelakaan lalu lintas, dan lainnya. Selain itu, peralatan kesehatan orthopedik juga difungsikan sebagai alat untuk mendukung organ tulang tubuh yang patah.



Gambar 1. Ilustrasi pemanfaatan *devices* ortopedik titanium dalam bidang kesehatan

Peralatan kesehatan ortopedik umumnya terbuat dari material titanium dan paduannya, dimana pemanfaatannya adalah lebih dari 1000 (seribu) ton setiap tahun [sumber: www.titanium.com.sg/TitaniumforMedicalApplication]. Titanium dan paduannya adalah logam yang mempunyai karakteristik tahan terhadap korosi bila bereaksi dengan cairan dan jaringan tubuh sehingga tidak menghasilkan sel logam beracun atau unsur-unsur yang memicu alergi pada tubuh manusia oleh karena itu logam ini dapat diterima oleh tubuh (bio-kompatibel). Serta, tingkat penerimaan titanium dan paduannya dari segi kekuatan (toughness) sebagai material implant adalah ada pada nilai 1,4 – 1,7 dari rasio antara kekuatan tarik dan daya tahan terhadap perambatan retak, dimana adalah lebih besar dari ratio penerimaan minimum yaitu 1,1. Karakteristik lain yang

dipunyai oleh titanium dan paduannya adalah kekuatannya tinggi serta massanya yang ringan oleh sebab itu sangat sesuai untuk menggantikan peralatan kesehatan orthopedik yang terbuat dari baja (steel) yang mempunyai kekuatan yang lebih rendah dan bobot yang berat. Bagaimanapun pengurangan berat peralatan orthopedik berdampak positif dalam mengurangi ukuran dan kuantitas tulang (*bone resorbtion*).

Di sisi lain, titanium dan paduannya juga dikenal sebagai material yang mempunyai sifat ketermesinan yang rendah (*low machineabilty*) sehingga disebut *difficult to cut material*. Material ini mempunyai sifat afinitas kimia (chemical affinity) yang tinggi terhadap hampir semua material pahat potong (cutting tool) [Ibrahim, 2009] sehingga menyebabkan timbulnya BUE (built-up edge) pada mata pisau (cutting edge) pahat potong. Hal ini membuat sudut geser membesar selama proses pemesinan yang menyebabkan daerah kontak antara geram dan permukaan pahat menjadi relatif kecil. Akibatnya terjadi peningkatan panas yang terlokalisasi pada pahat potong. Panas yang dihasilkan ini tidak cepat ditransfer oleh material titanium dan paduannya disebabkan material ini mempunyai sifat penghantar panas yang rendah. Oleh karena itu, suhu panas terkonsentrasi pada mata pisau dan permukaan pahat potong yang menghasilkan keausan pahat yang relatif cepat.

Selama ini, metode pemesinan dengan pelepasan listrik (*electrical discharge machining*, EDM) adalah yang populer digunakan untuk memesis peralatan kesehatan ortopedik bermaterial titanium. Hal ini disebabkan pemesinan dengan EDM tidak dipengaruhi oleh kekerasan material benda kerja sehingga dapat digunakan untuk pemesinan material dan paduannya yang keras dan sulit dipotong. Hanya saja, selama proses pemesinan dengan pelepasan listrik, tetesan kecil tembaga dan seng dari kawat akan menempel pada permukaan material benda kerja. Tembaga dan seng adalah unsur kimia yang tidak bio-kompatibel sehingga harus dilakukan proses lebih lanjut untuk membersihkan unsur logam tersebut pada permukaan material peralatan implant ortopedik, dimana itu membutuhkan biaya tambahan yang mahal. Metode lain yang biasanya digunakan untuk memesis peralatan kesehatan ortopedik bermaterial titanium adalah pemesinan dengan penggunaan pahat bermaterial super-keras (superhard tool material) seperti *Polycrystalline Diamond*, PCD. Bagaimanapun harga pahat potong berbasis PCD masih relatif mahal.

Oleh karena itu untuk menjawab permasalahan seperti dijelaskan di atas yaitu kesulitan dan mahalnya pemesinan alat kesehatan ortopedik bermaterial titanium, maka pada penelitian ini akan menerapkan suatu metode pemesinan baru yaitu dengan penerapan sistem pahat putar [harun, 2008].

BAB II. Tinjauan Pustaka

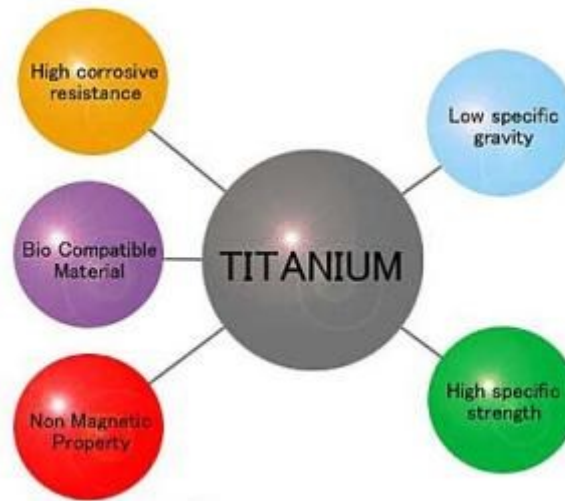
2.1 Titanium Sebagai Material Peralatan Kesehatan *Implant*

Peranan material titanium dan paduannya sangat penting dan berguna di dunia industri saat ini, utamanya dalam industri ruang angkasa, otomotif dan turbin. Karena titanium tahan terhadap korosi, adalah biokompatibel dan memiliki kemampuan bawaan untuk bergabung dengan tulang manusia, maka titanium dan paduannya juga menjadi sangat penting dalam bidang kesehatan. Peralatan kesehatan seperti instrumen bedah bermaterial titanium, batang titanium ortopedi, pin dan pelat, serta gigi titanium telah menjadi bahan dasar yang sangat berguna dalam dunia kedokteran.

Titanium 6AL4V dan 6AL4V ELI, paduannya terbuat dari Aluminium 6% dan 4% Vanadium, adalah jenis material titaanium yang paling umum digunakan dalam dunia kedokteran. Karena faktor harmonisasi dengan tubuh manusia, maka paduan titanium populer digunakan dalam prosedur medis, dan juga tidak membebani tubuh. Selain itu, material ini mempunyai *fracture resistance* yang baik ketika digunakan dalam implan ortopedik atau pun gigi. Berikut ini disarikan beberapa manfaat utama dari titanium medis [<http://www.supraalloys.com/medical-titanium.php>], yaitu:

- Kuat dan Ringan
- Tahan terhadap Korosi
- Tidak bersifat *toxic* dan *ferromagnetic*
- *Biocompatible* dan *Osseointegrated*
- Memungkinkan masa pakainya lama
- Fleksibel dan elastis sehingga cocok ditanam dalam tulang manusia

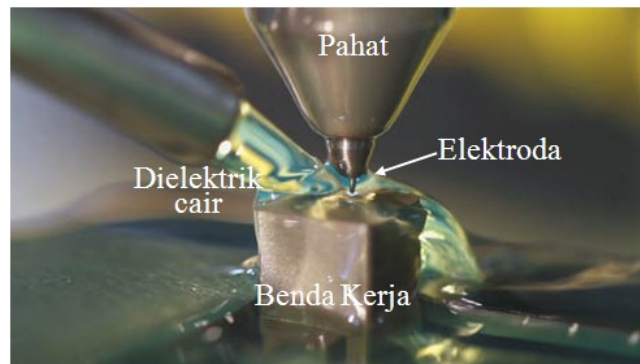
Manfaat utama material titanium dan paduannya adalah bobotnya yang ringan dan tahan terhadap korosi, serta tidak beracun. Oleh karena itu material ini mempunyai kemampuan untuk melawan korosi dari semua cairan tubuh, sehingga tidak heran apabila titanium menjadi logam pilihan dalam bidang kedokteran. Titanium juga sangat tahan lama, dimana kadang batang pin yang ditanam tubuh atau gigi titanium dalam rahang bisa bertahan selama 20 tahun bahkan lebih sehingga lebih ekonomis dibandingkan logam implan lainnya. Manfaat lain dari titanium untuk digunakan dalam pengobatan adalah sifat non-feromagnetik, yaitu memungkinkan pasien dengan implan titanium untuk diperiksa dengan amandengan MRI dan NMRIs.



Gambar 2. Manfaat Material Titanium untuk Peralatan Medis (Sumber: <http://www.supraalloys.com/medical-titanium.php>)

2.2 Pemessinan Peralatan Kesehatan Ortopedik Bermaterial Titanium

Selama ini, metode pemessinan dengan pelepasan listrik (*electrical discharge machining, EDM*) adalah yang populer digunakan untuk memessin peralatan kesehatan ortopedik bermaterial titanium. Hal ini disebabkan pemessinan dengan EDM tidak dipengaruhi oleh kekerasan material benda kerja sehingga dapat digunakan untuk pemessinan material dan paduannya yang keras dan sulit dipotong. Prinsip kerja pemessinan EDM adalah proses manufaktur dimana bentuk yang diinginkan diperoleh dengan menggunakan lucutan listrik (percikan api). Bagian material yang dihilangkan dari benda kerja melalui serangkaian lucutan listrik secara berulang diantara dua elektroda yang dipisahkan oleh dielektrik cair dan diberi tegangan listrik, lihat gambar 3. Ada dua jenis pahat potong (*cutting tool*) *electrical discharge* pada pemessinan EDM yang biasa digunakan untuk pembuatan peralatan kesehatan, yaitu berjenis elektroda dan kawat (*wire*). Pemessinan EDM elektroda umumnya dipakai untuk membentuk geometri suatu produk, sedangkan yang lainnya umum digunakan untuk membuat lubang dan memotong permukaan. Hanya saja, ada beberapa keterbatasan dalam penerapan pemessinan EDM. Diantaranya, pemessinan EDM dengan elektroda hanya bisa digunakan untuk membentuk produk dengan bentuk tertentu. Sedangkan pemessinan dengan kawat EDM adalah dibatasi kemampuannya untuk membuat bentuk geometri seperti bentuk permukaan cekung tertentu [Frank, 2008]. Selain itu, penerapan metode pemessinan EDM untuk pembuatan alat kesehatan ortopedik titanium menghadapi permasalahan, yaitu tetapan kecil tembaga dan seng dari elektroda atau kawat akan menempel pada permukaan material benda kerja [Benes, 2006]. Tembaga dan seng adalah unsur kimia yang tidak bio-kompatibel sehingga harus dilakukan proses lebih lanjut untuk membersihkan unsur logam tersebut pada permukaan material peralatan ortopedik implan, dimana itu membutuhkan biaya tambahan yang mahal.

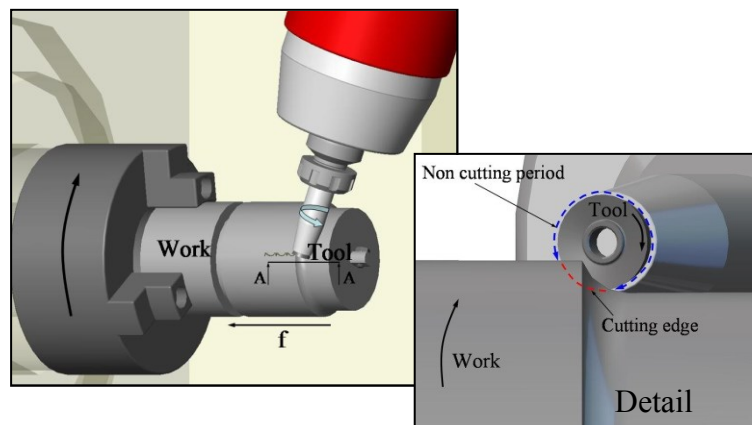


Gambar 3. Ilustrasi pemesian EDM jenis elektroda [Source: MTD Micro Molding]

Metode lain yang biasanya digunakan untuk memesian peralatan kesehatan ortopedik bermaterial titanium adalah pemesian CNC dengan penggunaan pahat bermaterial super-keras (*superhard tool material*) seperti *Polycrystalline Diamond*, PCD [Bejjani, 2011]. Bagaimanapun harga pahat potong berbasis PCD masih relatif mahal.

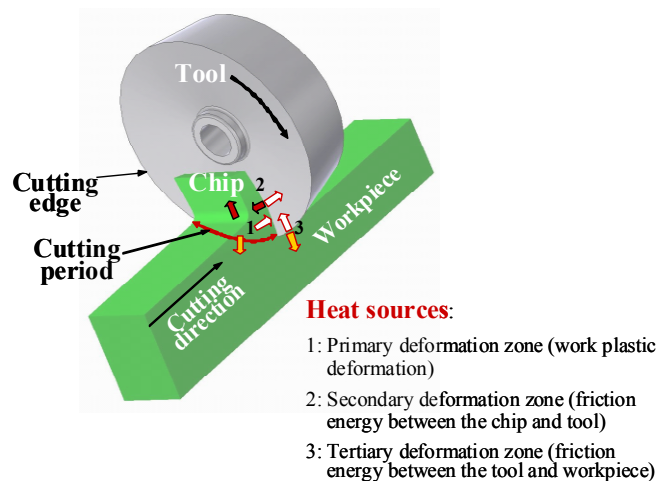
2.3 Pemesian dengan Sistem Pahat Berputar (*Rotary Tool System*)

Salah satu metode untuk menurunkan suhu pemotongan serta untuk meningkatkan produktivitas pemesian adalah dengan menggunakan pahat potong berputar dalam proses pemesian bubut (Harun et al., 2009). Metode pemotongan ini diilustrasikan dalam gambar 4, dimana dengan pahat potong yang berputar maka mata pisau (*cutting edge*) akan didinginkan selama periode tanpa pemotongan (*non cutting period*) dalam satu putaran pahat potong. Hal ini diharapkan bahwa suhu pahat potong akan menurun dibandingkan dengan proses pemesian bubut konvensional (pahat potong diam). Selain itu juga diharapkan bahwa proses pemesian dengan pahat berputar ini dapat digunakan untuk pemotongan kecepatan tinggi (*high speed cutting*) untuk material Magnesium (*Magnesium Alloy*) dan material yang sulit dipotong (*difficult to-cut materials*) seperti paduan Nikel (*Nickel Alloy*), Titanium (*Titanium Alloy*).



Gambar 4. Ilustrasi proses pemesian bubut dengan pahat berputar

Panas yang dihasilkan akibat deformasi geram selama proses pemesinan bubut dengan pahat berputar berpotensi dihasilkan dari empat sumber panas (*heat source*). Sumber panas ini terdiri atas tiga zone deformasi yang dekat dengan mata pisau pahat (*tool cutting edge*) seperti terlihat pada Gambar 5, dimana biasanya disebut masing-masing dengan zone deformasi utama (*primary*), kedua (*secondary*), dan ketiga (*tertiary*). Selain itu, sumber panas yang lain adalah akibat akumulasi panas pada mata pisau pahat.



Gambar 5. Aliran panas selama proses pemesinan bubut dengan pahat berputar [Harun, 2009]

Pada daerah deformasi plastik (*primary deformation zone*), mata pisau (*cutting edge*) pahat berbentuk lingkaran berputar dan secara kontinnyu memotong material benda kerja sehingga menyebabkan terjadinya deformasi plastik material benda kerja menjadi geram (*chip*). Usaha untuk mendeformasi material benda kerja menjadi geram membutuhkan deformasi yang besar dengan laju regangan yang tinggi sehingga menyebabkan timbulnya panas pada daerah deformasi geser). Harun (2008) dalam penelitiannya melakukan eksperimen pengaruh kecepatan putar pahat terhadap gaya potong pada pemesinan bubut material baja S45C dengan pahat berputar. Dari eksperimen tersebut diperoleh hasil yaitu peningkatan kecepatan putar pahat menyebabkan suatu penurunan kecepatan potong sehingga diharapkan dapat memicu reduksi daya geser. Hal ini dapat menyebabkan penurunan energi geser spesifik dan selanjutnya penurunan panas yang dihasilkan selama deformasi geser.

Material yang digeser kemudian terdeformasi menjadi geram selanjutnya mengalir di atas permukaan geram pahat pada daerah deformasi kedua (*secondary deformation zone*). Panas yang timbul dari daerah deformasi kedua adalah dihasilkan akibat deformasi plastik material benda kerja dan energi gesek antara pahat potong dan geram. Oleh karena itu panas yang tinggi biasanya terjadi pada daerah deformasi kedua ini. Panas yang timbul pada daerah deformasi ini dialirkan menuju geram dan pahat potong.

Selanjutnya pada daerah deformasi ketiga (*tertiary deformation zone*), panas yang dihasilkan pada daerah antarmuka (*interfece*) antara pahat dan benda kerja, dimana tepi pahat (*flank tool*) berputar sambil bergerak sepanjang permukaan benda kerja dan menghasilkan panas melalui energi gesek antara pahat dan benda kerja. Suhu yang meningkat akibat panas yang timbul oleh pembentukan permukaan baru benda kerja pada daerah deformasi ketiga adalah dialirkan kedalam benda kerja.

Pada pemesinan bubut dengan pahat berputar, periode tanpa pemotongan (*non cutting period*) menjadi pendek dengan peningkatan kecepatan putar pahat, hal ini mengartikan bahwa periode pendinginan pahat menjadi pendek. Oleh karena itu pada batas kecepatan tertentu, suhu mata pisau pahat pada ujung periode pendinginan belum cukup dingin ketika masuk kembali kedalam daerah pemotongan sehingga suhu mata pisau pahat terus meningkat akibat akumulasi panas.

2.4 Simulasi dan Eksperimental Pemesinan Turning dengan Pahat Berputar

2.4.1 Pembuatan model 3D Pemesinan Turning dengan Pahat Berputar dengan *Finite Element Method*(FEM)

Pemesinan aktual turning dengan pahat berputar dapat dilihat pada gambar 7. Secara geometri, metode pemesinan ini dikarakterisasi oleh beberapa parameter yaitu mata pisau pahat yang berbentuk sirkular (*circular cutting edge*), sudut geram normal (*normal rake angle*) dan *clearance angle*. Selain itu, seperti didefinisikan dalam gambar 7 bahwa posisi relatif antara mata pisau pahat dengan benda kerja (*workpiece*) dimungkinkan ada dua yaitu sudut inklinasi, i (*inclination angle of the tool holder*) dan tinggi offset, h (*offset angle θ*). Secara kinematik, ada tiga gerakan yang terlibat dalam metode pemesinan ini yaitu: (1) Gerak potong, kecepatan potong workpiece, V_w , (2) Gerakan makan pahat, f (*feed rate of the tool*), dan (3) Kecepatan putaran pahat V_T (*tool rotation speed*), yang mana menyebabkan kecepatan tangensial pahat.

Pemodelan Material

Setelah pemodelan pahat potong dan benda kerja, selanjutnya dilakukan pemodelan material baik itu untuk pahat *round tool* insert maupun benda kerja. Material pahat potong *round tool insert* yang digunakan dalam penelitian ini adalah WC-Co (Tungsten Carbide, Uncoated). Untuk keperluan verifikasi pemesinan turning dengan pahat yang berputar, maka material benda kerja (*workpiece*) yang digunakan ada dua jenis, yaitu (1) AISI 1045 yang digunakan untuk verifikasi awal dalam aspek suhu dan gaya pemotongan, dan (2) material alat kesehatan ortopedik titanium alloy Ti-6Al-4V. Alasan dilakukannya verifikasi awal model pemesinan turning dengan pahat berputar menggunakan material potong AISI 1045 adalah karena harga material ini relatif murah sehingga pengambilan sampel pengujian dalam jumlah yang banyak bukan menjadi masalah secara ekonomis.

Dalam rangka memodelkan material pahat dan benda kerja, ada tiga parameter pemodelan yang harus didefinisikan dalam Perangkat Lunak FEM Deform 3D yang digunakan dalam penelitian ini. Tiga parameter itu meliputi yang pertama adalah sifat mekanis dan fisik material pahat potong *round tool insert* dan benda kerja AISI 1045 serta Titanium Alloy Ti-6Al-4V. Parameter yang kedua adalah model *flow stress materials* yang dalam penelitian ini digunakan model Oxley (Oxley, 1989), yang persamaannya didefinisikan sebagai berikut:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) \quad (1)$$

dimana, $\bar{\sigma}$ adalah *Flow stress*, $\bar{\epsilon}$ adalah *Effective plastic strain*, $\dot{\bar{\epsilon}}$ adalah *Effective strain rate*, dan T adalah *Temperature* atau suhu. Metode ini sangat direkomendasikan untuk model flow stress material disebabkan kemampuannya mengikuti sifat material sebenarnya. Dengan metode ini, parameter yang dimasukkan adalah nilai *effective strain*, *effective strain rate* dan suhu (*temperature*).

Dan parameter yang ketiga adalah model *tool-chip interface*. Friksi sepanjang daerah kontak antara pahat dan benda kerja atau tool-work (lihat gambar 5) mempengaruhi pembentukan geram, *built-up edge formation*, suhu pemotongan, dan keausan pahat. Model matematis *tool-work interface* yang digunakan dalam pemodelan FEM ini adalah Model Coulomb Friction yang didefinisikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \tau &= \mu \sigma_n, & \text{jika } \mu \sigma_n &< \bar{m} \frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \\ \tau &= \bar{m} \frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{3}}, & \text{jika } \mu \sigma_n &> \bar{m} \frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (2)$$

dimana, τ adalah tegangan *frictional shear* dan σ_n adalah tegangan normal relatif terhadap permukaan kontak. σ_{eq} adalah *equivalent flow stress*. Sedangkan μ adalah koefisien *friction* dan \bar{m} *shear factor*, dimana itu diasumsikan konstan.

Pemodelan Kinematics Rotary Tool

Seperti sudah dijelaskan sebelumnya bahwa ada tiga gerakan utama dalam pemesinan turning dengan pahat berputar yaitu kecepatan putar pahat, kecepatan potong dan gerak makan. Hubungan antara kecepatan potong V_w dan kecepatan putar pahat V_T adalah didefinisikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\tan i_d = \frac{V_T}{V_w \cdot \cos \theta \cdot \cos i} \quad (3)$$

dimana i_d adalah sudut inklinasi (*the incline angle*) yang disebut juga sudut inklinasi dinamik dimana adalah resultan vektor dari kecepatan potong dan kecepatan putar pahat. Peningkatan kecepatan putar pahat memicu peningkatan sudut inklinasi dinamik. Hal ini menyebabkan perubahan aliran geram (Shaw et al., 1952) sehingga mekanika pemotongan berubah dari pemotongan orthogonal menjadi oblique.

Kecepatan putar pahat V_T dalam pemesinan turning dengan dapat dimodelkan dengan persamaan sebagai berikut, yaitu:

$$V_T = \omega \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (4)$$

dimana ω adalah kecepatan sudut putar pahat dan x , y dan z adalah jari-jari pahat dalam arah sumbu x , y dan z , masing-masing. Pada pemodelan ini diasumsikan putaran pahat adalah dalam arah sumbu y sehingga nilai y dalam persamaan 4 menjadi nol.

Kecepatan potong V_w (m/min) yang merupakan kecepatan tangensial benda kerja (*workpiece*) dapat dimodelkan dengan persamaan sebagai berikut, yaitu:

$$V_w = \frac{\pi D N}{1000} \quad (5)$$

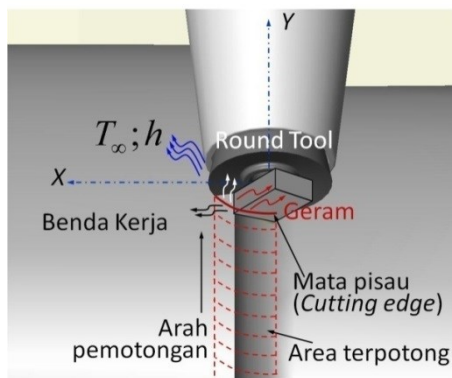
dimana D adalah diameter benda kerja dalam satuan mm dan N adalah kecepatan putar benda kerja dalam satuan rpm.

Selain parameter kecepatan di atas, gerak makan dari pahat terhadap benda kerja (lihat gambar 7) juga menjadi bagian dari sifat kinematik pemesinan turning dengan pahat berputar. Gerak makan f (mm/rev) ini dapat diubah dalam gerakan linear, dimana gerakan ini dapat dimodelkan dengan persamaan berikut ini.

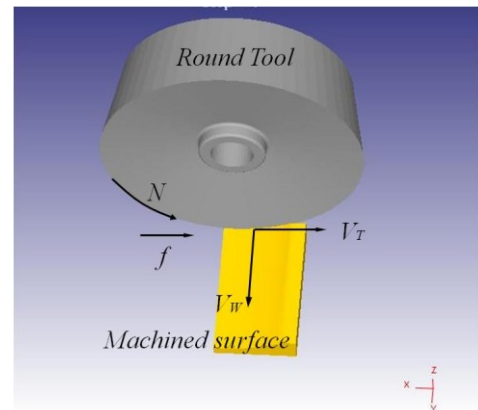
$$f_r = N f \quad (6)$$

dimana f_r adalah kecepatan makan dengan satuan mm/min.

Kinematis pemesinan turning dengan pahat berputar dapat disederhanakan dalam rangka kemudahan dalam proses simulasi seperti diilustrasikan dalam gambar 9. Secara prinsip permukaan terpotong (*machined surface*) yang berbentuk lingkaran bisa diasumsikan sebagai bentuk persegi, dimana besaran dan arah kecepatan (gerakan) yang terlibat tidak berubah. Selain itu, kecepatan potong diasumsikan oleh gerakan pahat dalam arah sumbu Y. Sebagai catatan bahwa semua model persamaan gerakan tersebut di atas dilibatkan dalam pemodelan turning dengan pahat berputar.



a. Aktual kinematika turning dengan pahat berputar

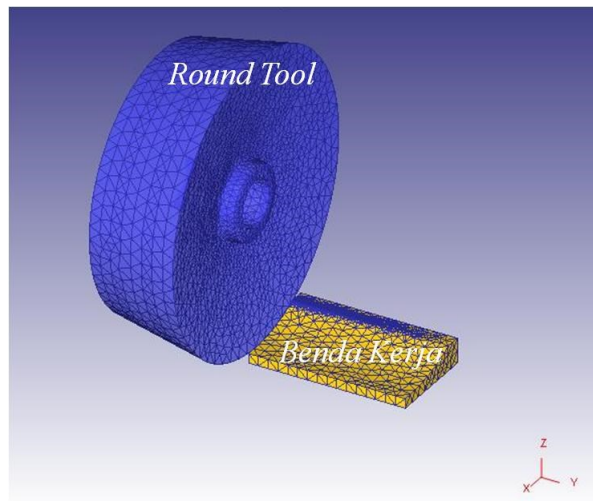


b. Penyederhanaan kinematika turning dengan pahat berputar

Gambar 9. Pemodelan kinematik pahat berputar (sudut inklinasi $i=0$ dan sudut offset $\theta=0$).

Pembuatan Meshing

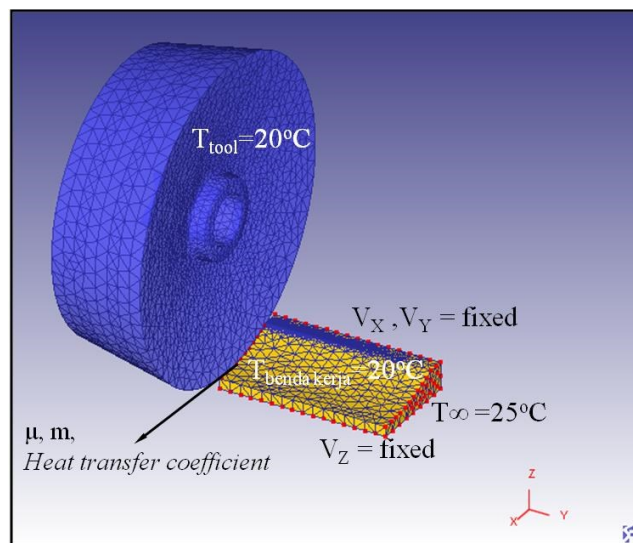
Dalam pemodelan berdasarkan *Finite Element Method*, pembagian benda menjadi beberapa bagian yang disebut *meshing* adalah hal yang sangat penting. Ukuran mesh yang sangat kecil adalah diperlukan utamanya daerah kontak antara pahat dan benda kerja. Hal ini disebabkan sangat besarnya *gradient* suhu dan tegangan dalam daerah tersebut selama simulasi pemesinan. Jenis elemen yang digunakan pada pemodelan FEM ini adalah elemen tetrahedral. Diasumsikan bahwa pahat *round tool insert* adalah kaku (*rigid*) memotong material benda kerja (*workpiece*) yang plastis. Untuk memproses mesh *round tool insert*, jumlah elemen tetrahedral yang diberikan berjumlah 25000 elemen, sedangkan jumlah element tetrahedral yang tersusun dalam benda kerja adalah diberikan 25% dari kecepatan makan (*feed rate*). Tetrahedral mesh dari *round tool insert* dan benda kerja dapat dilihat dalam gambar 10.



Gambar 10. Tetrahedral mesh dari pahat dan benda kerja.

Kondisi Batas

Kondisi batas (*boundary condition*) menentukan bagaimana batas suatu objek pahat berinteraksi dengan objek benda kerja (*workpiece*) dan dengan lingkungan. Dalam pemodelan ini, kondisi batas yang diberikan adalah (1) suhu awal pahat round tool insert dan workpiece adalah 20°C , (2) shear factor (\bar{m}) dan friction factor (μ) adalah 0.6, (3) koefisien perpindahan panas (*heat transfer coefficient*) pada daerah antar muka (*interface*) pahat dan benda kerja adalah tergantung pada jenis material kontak (material pahat dan benda kerja), (4) Suhu lingkungan diasumsikan 25°C , (5) Kecepatan benda kerja dalam arah sumbu X, Y dan Z adalah *fixed*, dan (6) Pahat berputar dan bergerak dalam arah sumbu Y. Ilustrasi dari kondisi batas dalam pemodelan FEM ini dapat dilihat pada gambar 11.



Gambar 11. Kondisi batas pemodelan pemesinan turning dengan pahat berputar berdasarkan FEM.

4.2.2 Simulasi Pemesinan Turning dengan Pahat Berputar

Setelah pemodelan pemesinan turning dengan pahat berputar berdasarkan FEM selesai dilakukan, maka langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi pemesinan turning dengan pahat berputar dengan kondisi pemotongan yang disesuaikan dengan kondisi pemesinan aktual. Ada beberapa parameter yang dilibatkan dalam proses simulasi ini, pertama adalah parameter pemesinan seperti kecepatan putar pahat, kecepatan potong, dan gerak makan. Parameter pemesinan turning dengan pahat berputar yang lain yaitu sudut inklinasi, i dan sudut offset, θ belum dilibatkan dalam simulasi ini. Lebih jelasnya parameter pemesinan yang terlibat dalam pemesinan ini dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter pemesinan yang dilibatkan dalam proses simulasi

Parameter Pemesinan	
Kecepatan Putar Pahat N, Rpm	0 ~ 4000
Kecepatan potong V_w , m/min	80 dan 150
Gerak makan f , mm/rev	0.2
Tebal pemotongan a , mm	0.5 dan 1
Sudut Inklinasi i , deg	0
Sudut Offset θ , deg	0

Parameter kedua adalah jenis dan geometri material benda kerja dan pahat *round tool insert*. Dalam simulasi ini, jenis material benda kerja adalah *Plain Carbon Steel* (AISI 1045), sedangkan jenis material pahat *round tool insert* adalah *uncoated tungsten carbide* (WC-Co). Informasi lebih jelas mengenai parameter ini bisa dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Parameter Jenis dan Geometri Material yang terlibat dalam proses simulasi.

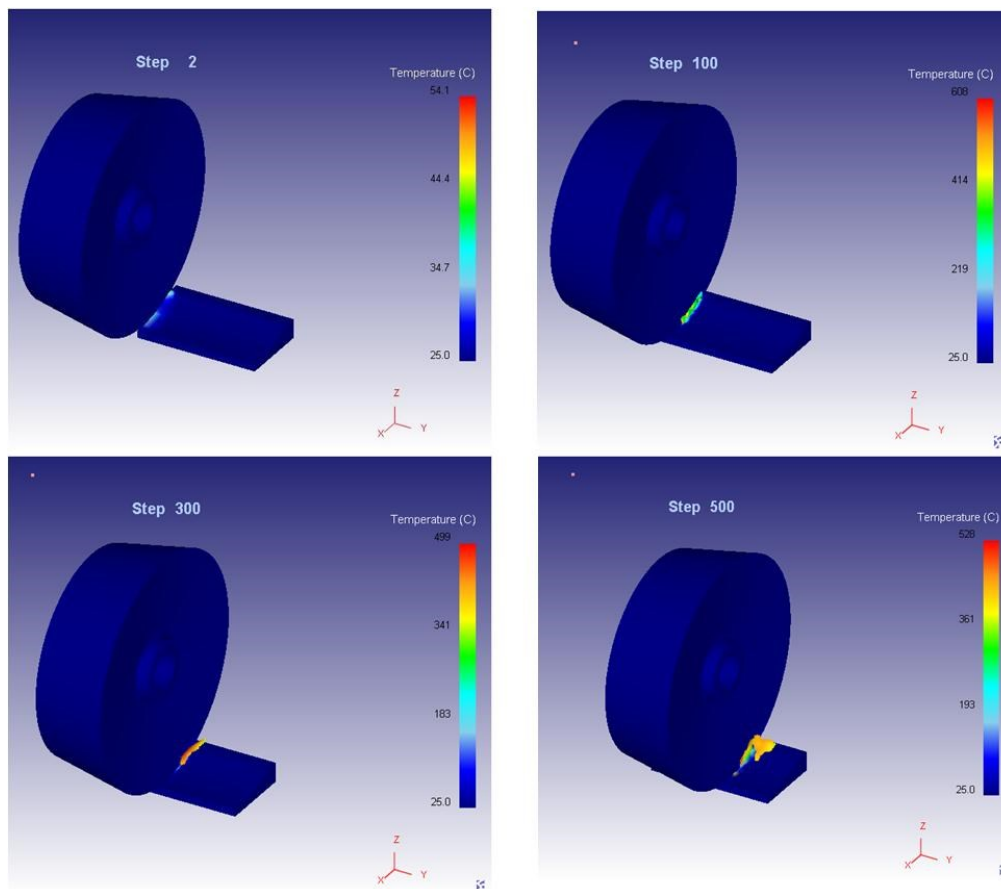
Benda Kerja (<i>Workpiece</i>)	
Jenis Material	Plain Carbon Steel (AISI 1045)
Geometri	Diameter 50 dan 100 mm
Pahat <i>Round Tool Insert</i>	
Jenis Material	Uncoated tungsten carbide, WC-Co
Geometri	Jenis RPMT 1604 MO-BB (Kyocera)
	Sudut relief $\alpha=11^\circ$
	Diameter $D=16$ mm

Parameter selanjutnya adalah sifat mekanik dan termal serta kondisi batas dalam proses simulasi, dimana ini ditampilkan dalam tabel 3.

Tabel 3. Sifat mekanik dan termal serta kondisi batas dalam proses simulasi

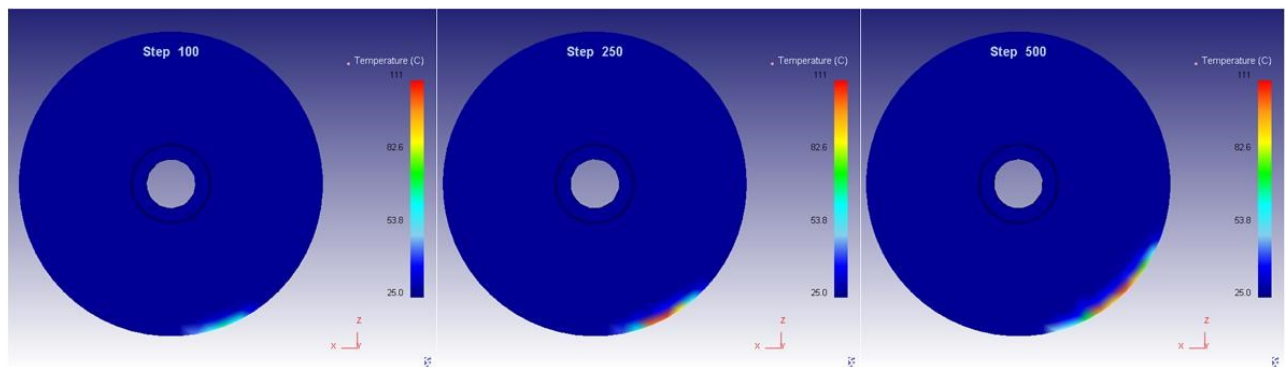
Sifat Material Pahat (<i>Uncoating Tungsten Carbide, WC-Co</i>)	
<i>Thermal Conductivity</i> (W/mK)	58.9888
<i>Heat capacity</i> (J/Kg K)	15.0018
<i>Ultimate tensile strength</i> (MPa)	3,000
<i>Modulus of elasticity</i> (GPa)	650
<i>Poisson's ratio</i>	0.25
Sifat Material Benda Kerja (AISI 1045)	
<i>Thermal Conductivity</i> (W/mK)	40
<i>Heat capacity</i> (J/Kg C)	432.6
<i>Ultimate tensile strength</i> (MPa)	565
<i>Modulus of elasticity</i> (GPa)	200
<i>Poisson's ratio</i>	0.290
Kondisi Batas	
Suhu awal °C	20
<i>Shear friction factor</i>	0.6
<i>Heat transfer coefficient</i> pada <i>workpiece-tool interface</i> (N/s. mm°C)	45

Setelah simulasi selesai dilakukan, pembentukan geram (*chip deformation*) selama proses pemesian turning dengan pahat berputar bisa diamati. Seperti terlihat pada gambar 12, deformasi plastis benda kerja (AISI 1045) dimulai setelah pahat memotong benda kerja dengan terbentuknya geram pada mesh awal sampai pada dimana geram sudah terbentuk sempurna pada kondisi yang *steady*.

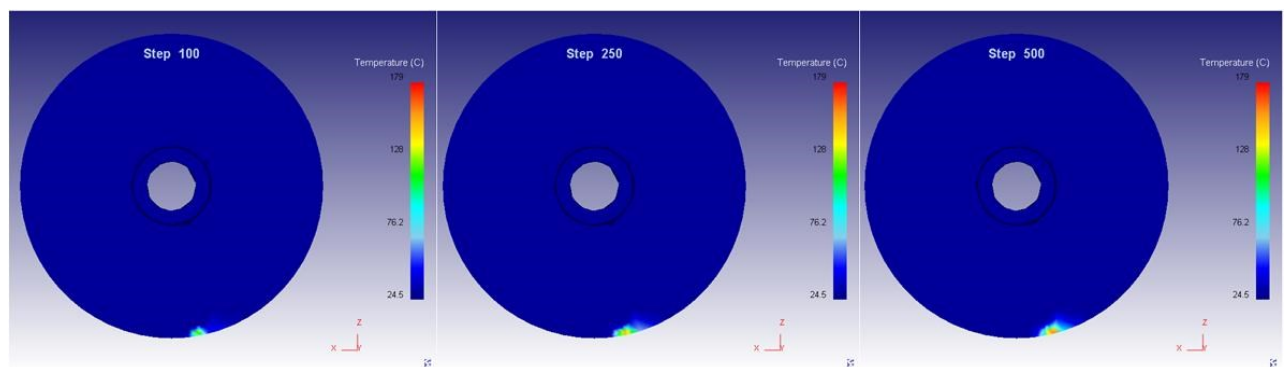


Gambar 12. Deformasi pembentukan geram (*chip*) dari awal terbentuknya sampai kondisi *steady*.

Hal yang menarik dari simulasi pemesinan turning dengan pahat berputar seperti diilustrasikan pada gambar 13.a adalah pahat potong yang mata pisaunya (*cutting edge*) berbentuk bulat (*round tool*) diputar sambil memotong benda kerja. Akibatnya ada indeks mata pisau yang secara kontinyu masuk dalam daerah pemotongan (*cutting zone*) untuk menyayat benda kerja dan kemudian keluar dari daerah pemotongan untuk didinginkan selama periode tanpa pemotongan (*non cutting period*) selama satu putaran pahat potong. Panas yang dihasilkan akibat deformasi benda kerja menjadi geram tidak terakumulasi pada satu area pada mata pisau (*cutting edge*). Hal ini berbeda jika dibandingkan dengan pahat potong tidak berputar seperti pada pemesinan turning konvensional, dimana panas yang dihasilkan terakumulasi pada daerah pemotongan, lihat gambar 13.b. Hal ini diharapkan bahwa suhu pahat potong pada pemesinan turning dengan pahat berputar akan menurun dibandingkan dengan proses pemesinan bubut konvensional (pahat potong diam).



a. Pahat berputar

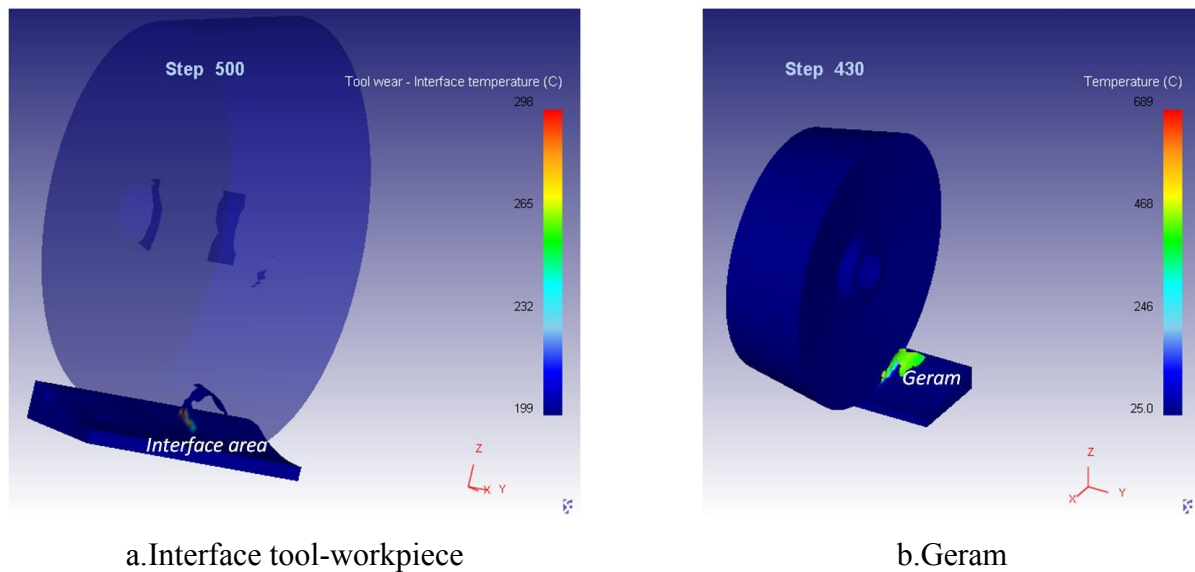


b. Pahat diam

Gambar 13. Ilustrasi *self cooling* dari pemesinan turning dengan pahat berputar

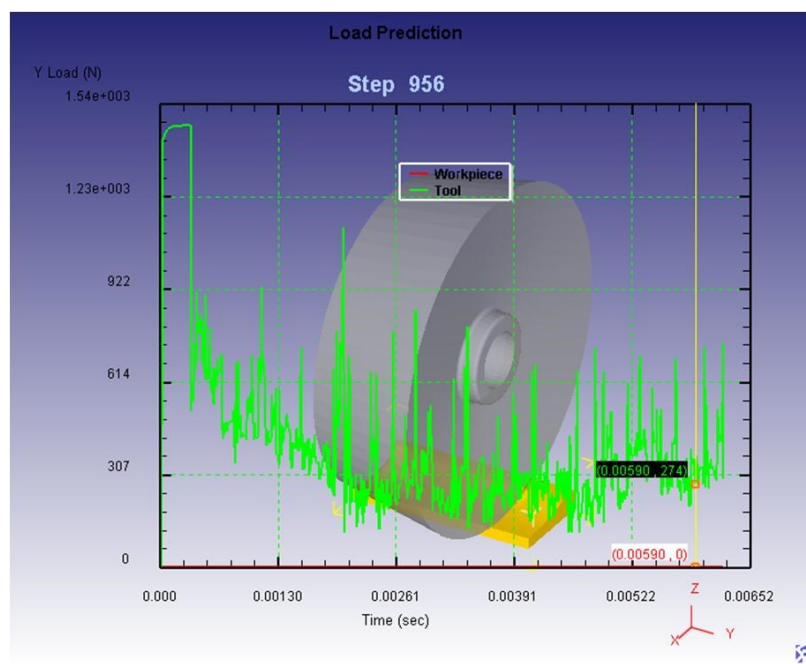
Luaran dari proses simulasi pemesinan turning dengan pahat berputar ada beberapa aspek, yang dianalisis dalam simulasi ini diantaranya suhu dan gaya pemotongan. Selama proses simulasi pemesinan, aliran panas didistribusikan pada tiga area yang bisa diamati, yaitu pertama area distribusi panas pada pahat *round insert tool*, dimana suhu pada indeks mata pisau pahat bergerak

sepanjang putaran pahat seperti diilustrasikan pada gambar 13.a. Kedua adalah area distribusi panas pada interface pahat dan benda kerja seperti diilustrasikan pada gambar 14.a. Terakhir adalah area distribusi pada geram (*chip*) dimana suhu terbesar diamati di area ini, lihat gambar 14.b.



Gambar 14. Daerah distribusi panas

Gaya pemotongan yang bisa diamati dari proses simulasi pemesian turning dengan pahat berputar ini ada tiga, yaitu masing-masing pada arah sumbu X, Y, dan Z. Besaran gaya pada arah sumbu Y merupakan gaya potong utama F_Y yang mana nilainya paling besar. Contoh dari gaya pemotongan yang dihasilkan dari simulasi pemesian turning dengan pahat berputar bisa dilihat pada gambar 15.



Gambar 15. Contoh gaya pemotongan selama simulasi pemesian turning dengan pahat berputar.

Berikut ini adalah hasil pengujian parameter pemesian kecepatan putar pahat terhadap aspek suhu pemesian dan gaya pemotongan. Tabel 4 berisi tabulasi data pengujian kecepatan putar pahat terhadap suhu interface tool-workpiece dan suhu geram. Sedangkan tabel 5 berisi tabulasi data pengujian kecepatan putar pahat terhadap gaya potong utama.

Tabel 4. Pengujian kecepatan putar pahat terhadap suhu pemesian (Kondisi pemesian: $V_w=150$ m/min, $f=0.2$ mm/rev, $a = 1$ mm, $i = 0$, $\theta = 0$, dan tanpa cairan pendingin)

No	Kecepatan putar pahat		Suhu pemotongan	
	N, Rpm	V_T , m/min	Interface Tool-workpiece, °C	Geram (<i>chip</i>), °C
1.	0	0	432	787
2.	50	2.5	384	755
3.	100	5.0	377	724
4.	200	10	371	708
5.	300	15	392	716
6.	500	25	389	711
7.	650	32.5	347	752
8.	700	35	332	737
9.	750	37.5	324	689
10.	800	40	371	742
11.	900	45	375	754
12.	1000	50	378	751
13.	1500	75	408	758
14.	2000	100	419	775
15.	2500	125	414	794
16.	3000	150	546	1070

Tabel 5. Pengujian kecepatan putar pahat terhadap gaya potong utama (Kondisi pemesian: $V_w=80$ m/min, $f=0.2$ mm/rev, $a = 0.5$ mm, $i = 0$, $\theta = 0$, dan tanpa cairan pendingin)

No	Kecepatan putar pahat		Gaya pemotongan
	N, Rpm	V_T , m/min	Gaya potong utama F_Y , N
1.	0	0	340,832*
2.	100	5.0	367,820*
3.	200	10	348,427
4.	300	15	364,161*
5.	500	25	354,084*
6.	600	30	300,202
7.	700	35	281,639
8.	800	40	284,986

9.	1000	50	290,242*
10.	1500	75	283,339*
11.	2000	100	272,194*
12.	2500	125	226,195*
13.	3000	150	232,926*
14.	3500	175	231,912*
15.	4000	200	242,094*
16.	4500	250	238,029

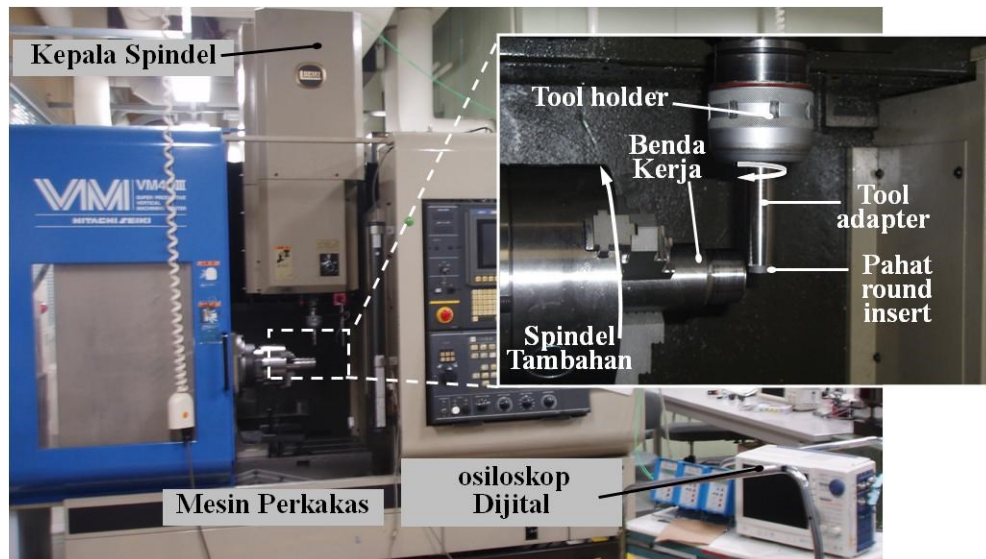
4.2.3 Verifikasi Hasil Simulasi Pemessinan Turning dengan Pahat Berputar

Setelah dilakukan pengujian parameter pemessinan turning dengan pahat berputar untuk material AISI 1045, maka selanjutnya adalah verifikasi secara ekperimental hasil pengujian secaran simulasi keternessinan (*machineability*) material AISI 1045 dengan sistem pahat putar. Rincian kegiatan pada tahap ini adalah sebagai berikut:

- Melakukan set-up eksperimen pemessinan dengan sistem pahat putar;
- Melakukan pengujian ekperimental pengaruh parameter pemessinan meliputi kecepatan putar dan potong terhadap suhu dan gaya pemotongan.
- Memvalidasi hasil pengujian simulasi keternessinan material AISI 1045 dengan pengujian secara eksperimen melalui perbandingan pengaruh parameter pengujian terhadap suhu pemotongan dan gaya. Hasil simulasi dinyatakan valid apabila deviasi antara hasil simulasi dan eksperimen relatif kecil (diasumsikan $\pm 10\%$).

Set-Up Eksperimen Pemessinan dengan Sistem Pahat Putar

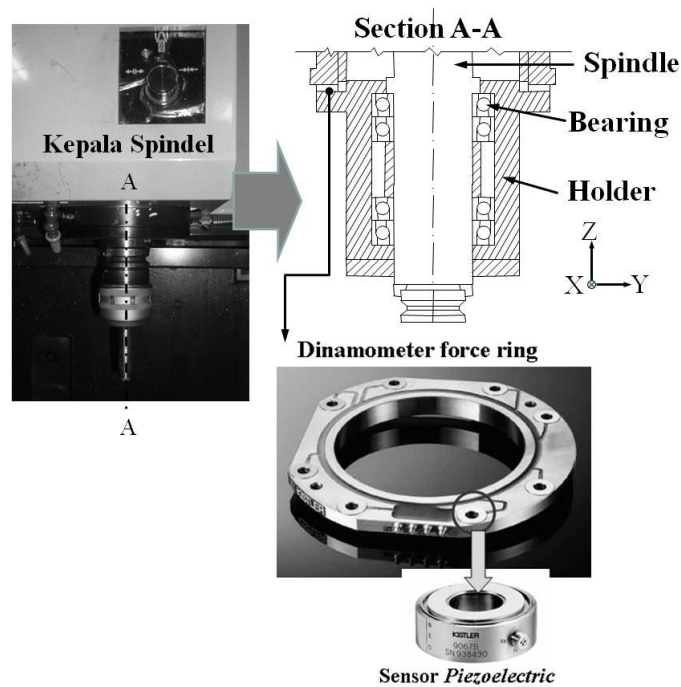
Gambar 16 memperlihatkan diagram skematik dari set-up eksperimen. Benda kerja (*workpiece*) berbentuk Silinder dari material Baja Karbon (AISI 1045) dengan ukuran diameter Ø 50 dan 100 mm dan panjang 120 mm dicekam oleh spindel benda kerja. Pahat Sisipan Round (RPTM 1604 MO-BB) yang digunakan berdiameter 16 mm dan mempunyai sudut geram normal 11°. Pahat sisipan ini dicekam pada suatu tool adapter khusus yang kemudian dipasang pada spindel utama mesin. Selama eksperimen pemessinan, cairan pemotong tidak digunakan atau pemessinan kering (*green machining*). Dijital osiloskop juga digunakan untuk mencatat besaran sinyal gaya dan suhu pemotongan. Kondisi pemotongan secara lengkap adalah dirangkum dalam Tabel 6.



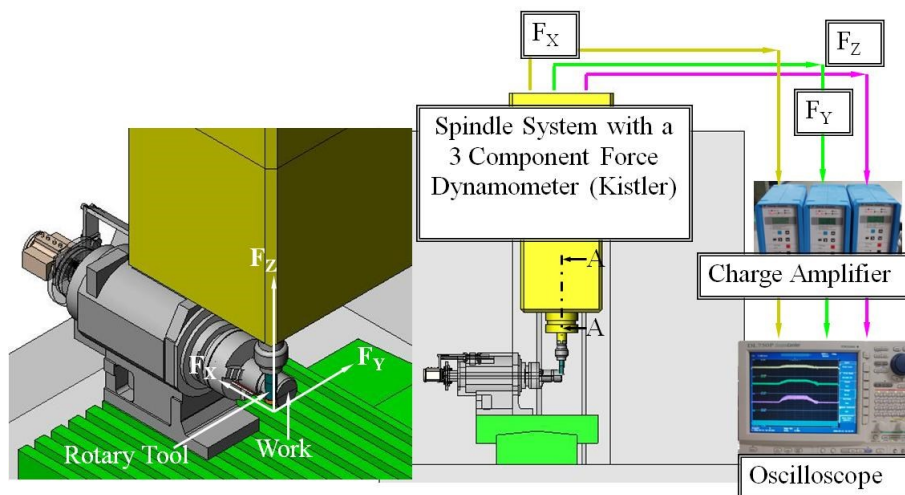
Gambar 16. Set-up eksperimen pemotongan turning dengan pahat berputar

Tabel 6. Kondisi Pemotongan

MATERIAL BENDA KERJA		Plain Carbon Steel (AISI 1045) Diameter=50 – 100 mm; Panjang=120mm
Pahat	Jenis:	RPMT 1604 MO-BB (Kyocera)
	Material:	Uncoated Carbide
	Geometri:	Normal rake dan relief angle $\alpha=11^\circ$, Diameter D=16 mm
Kecepatan putar pahat $N_T, \text{ min}^{-1}$		0 ~ 4000
Kecepatan potong $V_W, \text{ m/min}$		80; 150
Gerak makan $f, \text{ mm/rev}$		0.2
Depth of cut $a, \text{ mm}$		0.5; 1
Sudut Inklinasi $i, \text{ deg.}$		0
Sudut Offset $\theta, \text{ deg.}$		0
Cairan Pendingin		Kering (Dry)
Arah putaran pahat		CW



a. Dynamometer force ring



b. Skema pengukuran gaya pemotongan

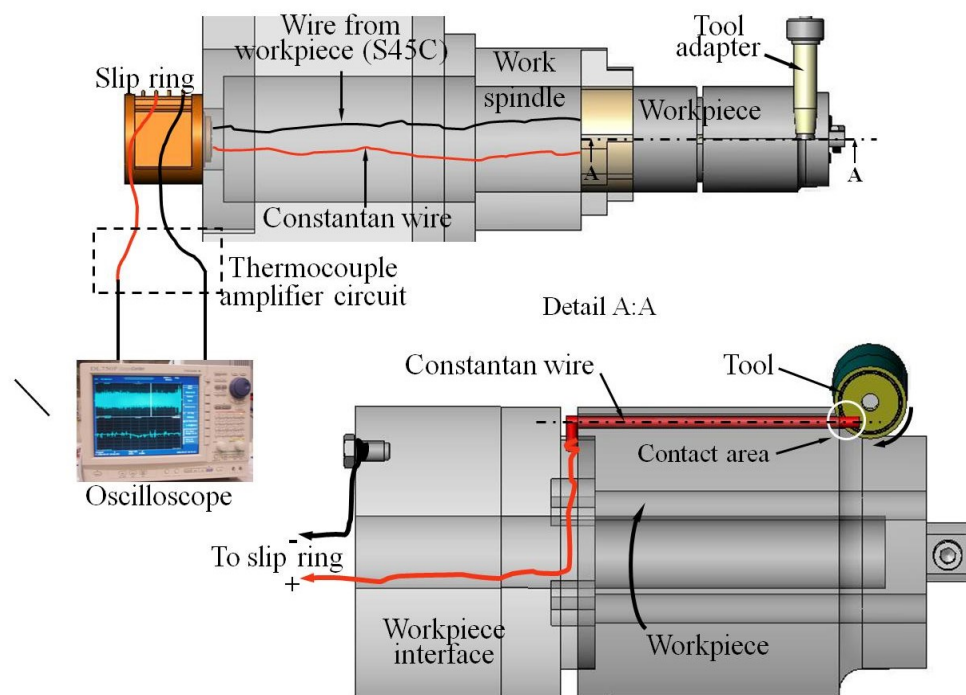
Gambar 17. Pengukuran gaya pemesinan

Data hasil unjuk kerja keternesinan material AISI 1045 dengan simulasi pemesinan turning dengan pahat berputar meliputi aspek gaya dan suhu pemesinan akan diverifikasi secara eksperimental. Gaya pemesinan dari pemesinan aktual turning diukur dengan menggunakan *Dynamometer force ring* yang tersusun dari delapan transduser piezoelectric force yang ditanam dalam bingkai berbentuk ring yang dipasang antara front cap spindel dan spindle head pada mesin perkakas (*machining centre*), lihat gambar 17.a. Skema dari pengukuran gaya pemotongan pada pemesinan turning dengan pahat berputar dapat dilihat pada gambar 17.b. Komponen gaya yang diukur ada tiga, yaitu gaya tangensial atau gaya potong utama, F_z , dimana merupakan gaya aksi

akibat benda kerja berputar dalam arah tangensial. Gaya aksial, F_x adalah komponen gaya longitudinal yang bereaksi dalam arah paralel terhadap sumbu putar benda kerja. Dan gaya radial, F_y adalah komponen gaya yang bereaksi dalam arah radial benda kerja. Ketiga komponen gaya tersebut di atas kemudian diukur dengan menggunakan dinamometer force ring. Sinyal gaya-gaya yang dibaca oleh sensor dinamometer dikirim ke *charge amplifier* sebelum dicatat dengan menggunakan osiloskop dijital. Setelah dilakukan proses kalibrasi dinamometer force ring (Harun, 2011), hubungan antara luaran sinyal gaya, V (mV) dengan gaya pemotongan, F (N) didefinisikan dengan persamaan berikut ini.

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7,749 & -4,461 & 0,036 \\ -5,882 & -9,186 & -0,652 \\ -0,586 & -1,399 & 9,291 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

(Unit koefisien : mV/N)



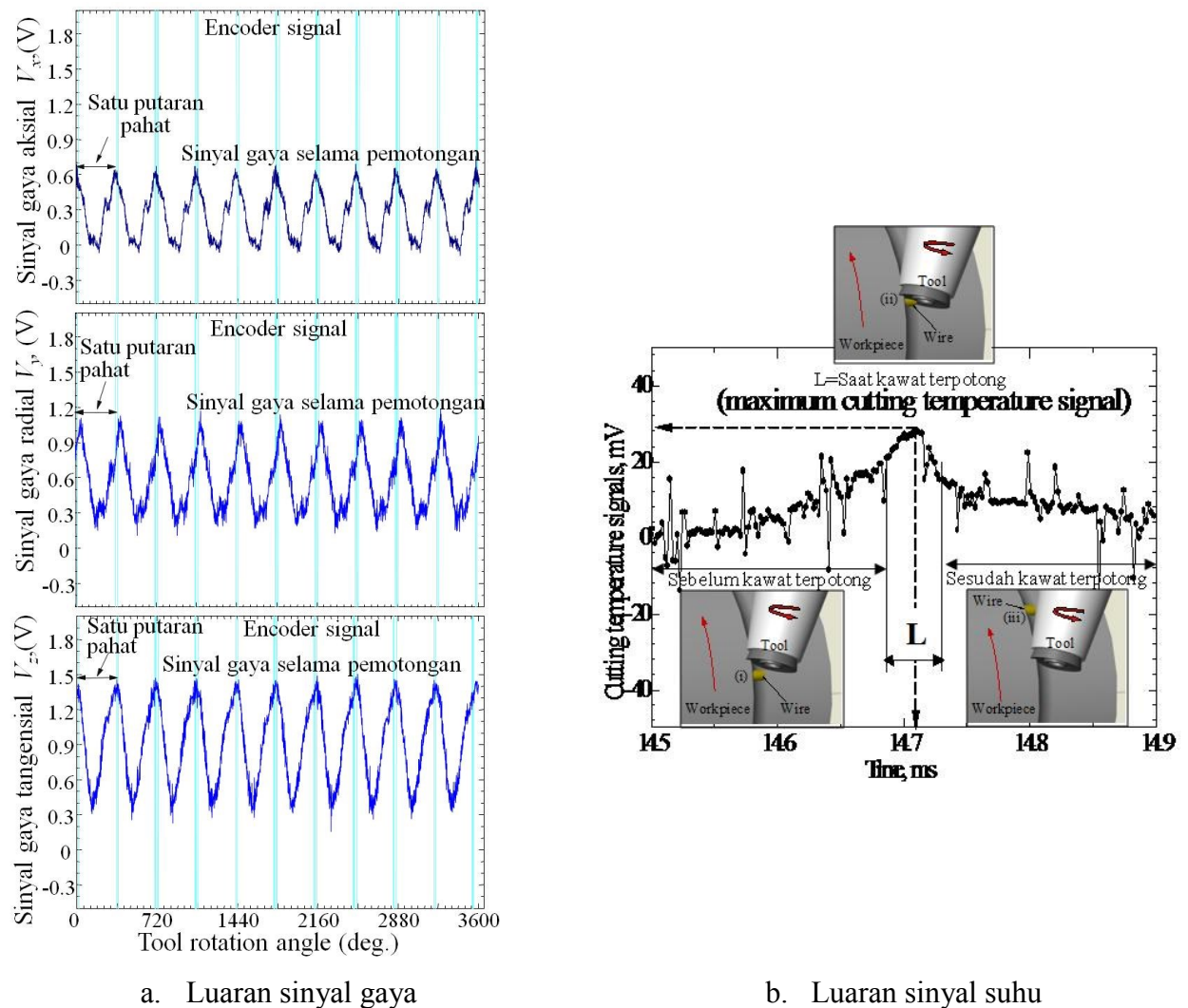
Gambar 18. Skema pengukuran suhu pemotongan dalam penelitian ini.

Prinsip dari pengukuran suhu pemotongan adalah termokopel dari pasangan kawat konstantan (*constantan wire*) dengan benda kerja (*work material*). Dengan prinsip termokopel ini, benda kerja dibagi menjadi dua bagian sehingga kawat konstantan bisa ditanam dalam benda kerja, seperti terlihat pada gambar 18. Ketika benda kerja dipotong oleh mata pisau pahat *round tool insert* pada daerah *interface tool-work*, kabel juga ikut terpotong dan seketika itu juga sinyal *thermoelectric* (emf) akan terbentuk antara kawat konstantan dengan benda kerja. Sinyal

thermoelectric ini merupakan representasi panas yang dihasilkan pada daerah *interface tool-work*. Berdasarkan pengujian kalibrasi termokopel wire-work, hubungan suhu T dan sinyal *thermoelectric* yang dihasilkan (emf) V (mV) pada daerah kontak antara kabel konstantan dengan pahat didefinisikan sebagai berikut:

$$T = 19.6V \quad (8)$$

Gambar 19 memperlihatkan contoh hasil pengukuran gaya dan suhu pemotongan. Gambar 19.a memperlihatkan hasil pengukuran sinyal gaya dalam unit mV, dimana itu akan dikonversi menjadi gaya dalam unit N dengan persamaan (7). Selain itu, pengukuran gaya mempunyai kepresisian sekitar $\pm 10\%$ (Harun, 2011). Gambar 19.b memperlihatkan hasil pengukuran suhu masih berupa sinyal *thermoelectric* (emf) dimana harus dikonversi menjadi besaran suhu dalam unit $^{\circ}\text{C}$ dengan persamaan (8).



Gambar 19. Luaran pengukuran sinyal gaya dan suhu.

Pengujian Eksperimental Pengaruh Parameter Pemesinan

Hasil pengujian pengaruh parameter pemesinan turning dengan pahat berputar utamanya kecepatan putar pahat terhadap gaya dan suhu pemotongan ketika pemesinan material AISI 1045 adalah disarikan dalam tabel 7 dan 8.

Tabel 7. Pengujian experimental pengaruh kecepatan putar pahat terhadap suhu pemesinan (Kondisi pemesinan: $V_w=150$ m/min, $f=0.2$ mm/rev, $a = 1$ mm, $i = 0$, $\theta = 0$, dan tanpa cairan pendingin)

No	Kecepatan putar pahat		Suhu pemotongan
	N, Rpm	V_T , m/min	Interface Tool-workpiece, °C
1.	0	0	452
2.	500	25	354
3.	1000	50	381
4.	1500	75	404
5.	2000	100	475

Tabel 8. Pengujian experimental pengaruh kecepatan putar pahat terhadap gaya potong (Kondisi pemesinan: $V_w=80$ m/min, $f=0.2$ mm/rev, $a = 0.5$ mm, $i = 0$, $\theta = 0$, dan tanpa cairan pendingin)

No	Kecepatan putar pahat		Gaya pemotongan
	N, Rpm	V_T , m/min	Gaya potong utama F_Y , N
1.	0	0	308
2.	40	2.5	279
3.	100	5.0	310
4.	300	15	314
5.	500	25	319
6.	1000	50	294
7.	1500	75	252
8.	2000	100	221
9.	2500	125	205
10.	3000	150	216
11.	3500	175	209
12.	4000	200	208

Validasi Pengujian Simulasi Ketermesinan Material AISI 1045

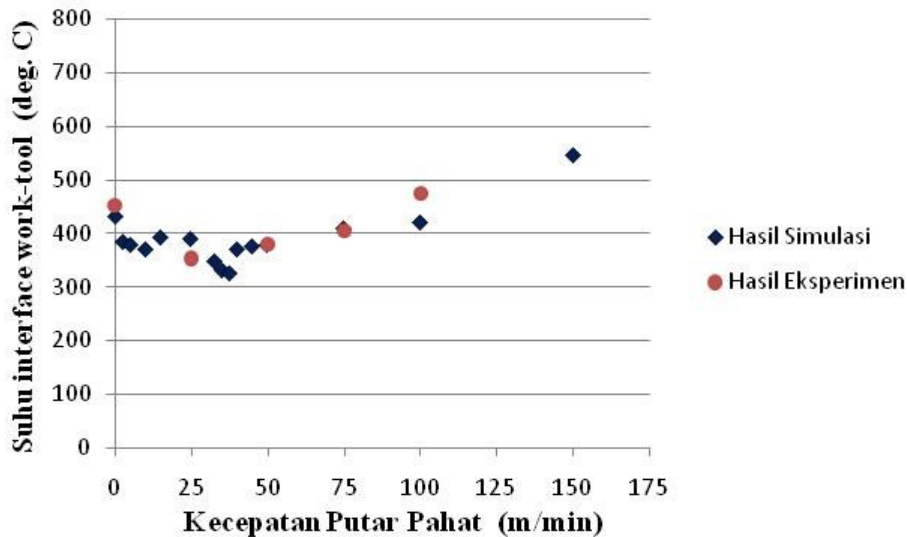
Penafsiran suhu dan gaya pemotongan yang dilakukan pada proses simulasi selanjutnya dibandingkan dengan hasil pengujian secara eksperimen. Nilai suhu pemotongan yang didapat dari hasil eksperimen mendekati hasil dari simulasi, begitu juga untuk nilai gaya pemotongan. Kedua hasil pengujian (simulasi dan eksperimen) dapat dilihat pada tabel 9 dan 10 serta gambar 20.a dan 20.b.

Tabel 9. Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen pengujian pengaruh kecepatan putar pahat terhadap suhu pemesinan (Kondisi pemesinan: $V_w=150$ m/min, $f=0.2$ mm/rev, $a = 1$ mm, $i = 0$, $\theta = 0$, dan tanpa cairan pendingin)

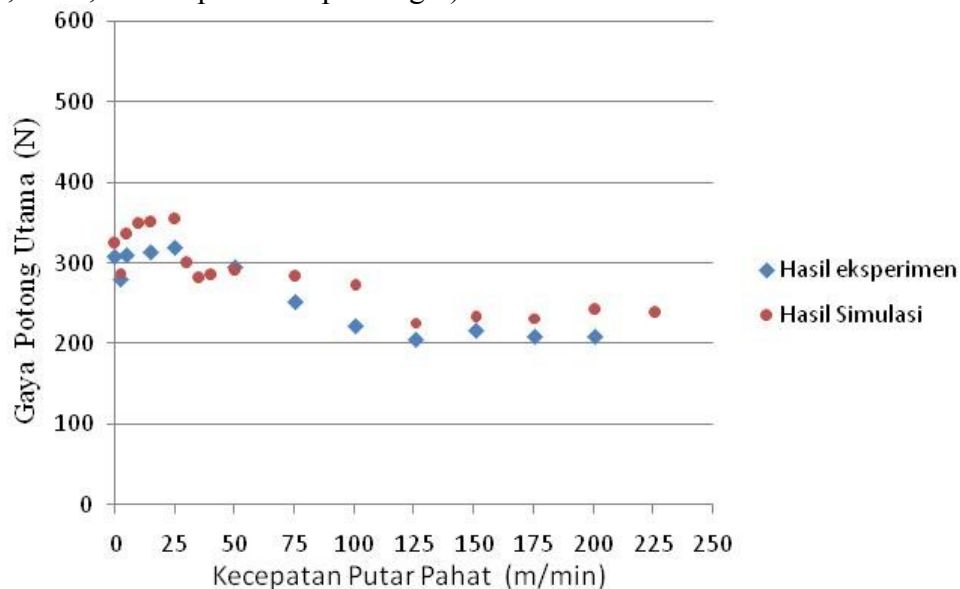
No	Kecepatan putar pahat		Suhu pemotongan (<i>Interface Tool-workpiece</i> , °C)		Prosentase <i>Error</i> %
	N, Rpm	V_T , m/min	Simulasi	Eksperimen	
1.	0	0	432	452	4,42
2.	500	25	389	354	-9,89
3.	1000	50	378	381	0,79
4.	1500	75	408	404	-0,99
5.	2000	100	416	475	12,42

Tabel 10. Pengujian kecepatan putar pahat terhadap gaya potong utama (Kondisi pemesinan: $V_w=80$ m/min, $f=0.2$ mm/rev, $a = 0.5$ mm, $i = 0$, $\theta = 0$, dan tanpa cairan pendingin)

No	Kecepatan putar pahat		Gaya pemotongan (Gaya potong utama, N)		Prosentase <i>Error</i> , %
	N, Rpm	V_T , m/min	Simulasi	Eksperimen	
1.	0	0	324	308	4,83
2.	40	2.0	288	279	2,96
2.	100	5.0	336	310	7,69
3.	300	15	351	314	10,49
4.	500	25	354	319	9,95
5.	1000	50	290	294	-1,35
6.	1500	75	283	252	10,92
7.	2000	100	272	221	18,83
8.	2500	125	226	205	9,36
9.	3000	150	233	216	7,35
10.	3500	175	232	209	9,84
11.	4000	200	242	208	13,93



- a. Suhu interface work-tool (Kondisi pemesinan: $V_w=150$ m/min, $f=0.2$ mm/rev, $a = 1$ mm, $i = 0$, $\theta = 0$, dan tanpa cairan pendingin)



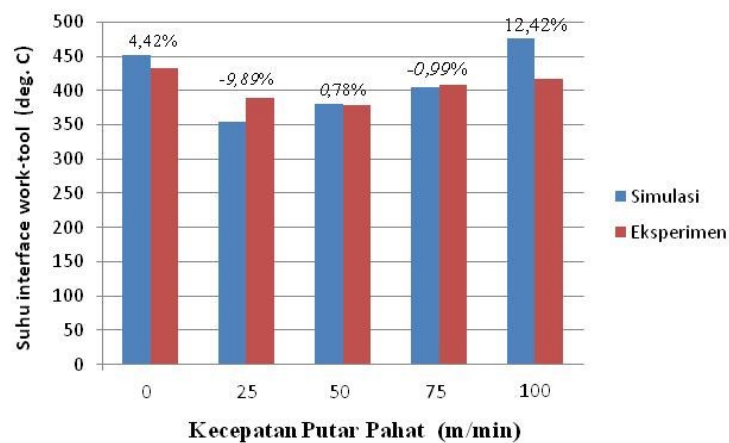
- b. Gaya potong utama (Kondisi pemesinan: $V_w=80$ m/min, $f=0.2$ mm/rev, $a = 0.5$ mm, $i = 0$, $\theta = 0$, dan tanpa cairan pendingin)

Gambar 20. Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen, (a) suhu *interface work-tool* (b) gaya potong utama.

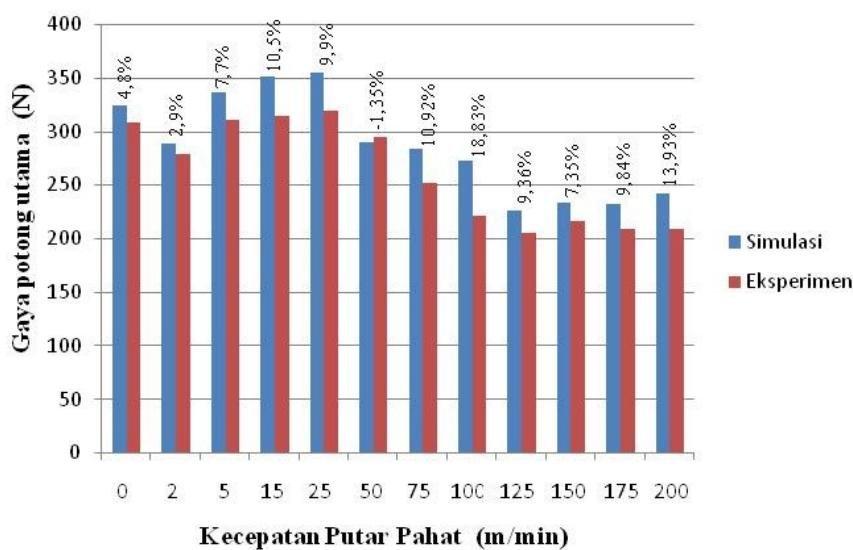
Gambar 20.a menunjukkan grafik perbandingan antara hasil pengujian secara simulasi dan eksperimen kecepatan putaran pahat terhadap suhu pemotongan pada kondisi pemesinan kecepatan potong $V_w=150$ m/min, gerak makan $f=0.2$ mm/rev, dan tebal pemotongan $a=1$ mm. Dari grafik pengujian secara simulasi terlihat bahwa suhu pada daerah *interface tool-work* saat pahat tidak berputar $V_T=0$ m/min yang bernilai sekitar 432 °C dimana adalah lebih tinggi dari suhu yang terukur ketika pahat diputar dengan kecepatan putaran pahat $V_T=25$ m/min yang bernilai sekitar 389 °C. Menariknya suhu yang terukur dalam batas kecepatan putaran pahat $V_T=50$ m/min sampai dengan

$V_T=150$ m/min cenderung meningkat. Selain itu suhu pemotongan minimum yang ditafsir pada proses simulasi yaitu sekitar 324°C pada kecepatan putar pahat $V_T=37.5$ m/min. Hasil ini tidak jauh berbeda ketika dilakukan pengujian secara eksperimen, dimana yang menjadi suhu minimum terukur pada batas kecepatan putar pahat 0 sampai dengan 50 m/min dan selanjutnya suhu pemotongan meningkat seiring peningkatan kecepatan putar pahat lebih dari 50 m/min.

Gambar 20.b menunjukkan grafik hasil pengujian secara simulasi pengaruh kecepatan putar terhadap gaya pemotongan utama pada kondisi pemesian kecepatan potong $V_W=80$ m/min, gerak makan $f=0.2$ mm/rev, dan tebal pemotongan $a=0.5$ mm. Seperti terlihat dalam grafik pada gambar 20.b, gaya potong utama pada batas kecepatan putar pahat $V_T=0$ sampai dengan $V_T=25$ m/min cenderung lebih besar dan perlahan-lahan turun pada kecepatan putar pahat lebih besar dari $V_T=25$ m/min dan kemudian konstan pada kecepatan putar lebih dari $V_T=100$ m/min. Hasil ini tidak jauh berbeda dengan yang ditunjukkan oleh data eskperimen.



- a. Prosentase error pengujian pengaruh kecepatan putar pahat terhadap suhu pemotongan. (Kondisi pemesian: $V_W=150$ m/min, $f=0.2$ mm/rev, $a = 1$ mm, $i = 0$, $\theta = 0$, dan tanpa cairan pendingin)



- b. Prosentase error pengujian pengaruh kecepatan putar pahat terhadap gaya potong. (Kondisi pemesian: $V_W=80$ m/min, $f=0.2$ mm/rev, $a = 0.5$ mm, $i = 0$, $\theta = 0$, dan tanpa cairan pendingin)

Gambar 21. Prosentase error pengujian simulasi dan eksperimen

Tabel 9 dan 10 serta gambar 21 memperlihatkan prosentasi error dari hasil pengujian secara simulasi dan eksperimen. Perbandingan hasil prosentasi *error* pengujian pengaruh kecepatan putar pahat terhadap suhu pemotongan dapat dilihat pada gambar 21.a, dimana perbedaan nilai (*prosentase error*) antara hasil pengujian simulasi dengan eksperimen relatif kecil yaitu secara umum sekitar $\pm 10\%$. Begitupun hasil yang sama diperoleh ketika pengujian pengaruh kecepatan putar terhadap gaya pemotongan, lihat gambar 21.b. Secara umum hasil pengujian secara simulasi lebih besar dibandingkan dengan eksperimen. Hal ini mungkin disebabkan pemilihan ukuran elemen mesh yang relatif besar pada benda kerja yang dekat dengan ujung mata pahat dibandingkan ujung pahat pemotongan sehingga perhitungan suhu dan gaya yang dihasilkan secara signifikan diperbesar oleh *remeshing* terus-menerus (Yanuar, 2010). Bagaimanapun, pengujian secara simulasi menunjukkan hasil yang relatif sesuai dengan hasil pengujian eksperimen. Oleh karena model simulasi ini dapat digunakan untuk optimasi parameter pemesinan material paduan titanium dengan sistem pahat putar dalam rangka rancang bangun peralatan sistem pahat putar modular.

BAB III. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

Tujuan yang hendak dicapai pada penelitian tahun II ini adalah :

- a. Mencari parameter pemesinan optimum yang meliputi diameter pahat, rasio antara kecepatan putar pahat dan kecepatan potong terhadap aspek suhu dan gaya pemotongan melalui proses simulasi pemesinan material paduan titanium dengan sistem pahat putar yang sudah tervalidasi.
- b. Merancang pemegang pahat putar (*rotary tool holder*) sistem modular dengan mempertimbangkan parameter pemesinan yang optimum, dimana dapat menangani beberapa jenis proses pemesinan peralatan kesehatan ortopedik implan seperti *surface, cut, grooving*, dan *thread*.
- c. Melakukan penilaian (*assesment*) keselamatan desain pemegang pahat putar sistem modular.
- d. Melakukan fabrikasi sistem pemegang pahat putar sistem modular berdasarkan rancangan untuk pemesinan peralatan kesehatan orthopedik implan.
- e. Melakukan pengujian teknis sistem pahat putar modular untuk pemesinan peralatan kesehatan orthopedik berbasis material titanium.

Hasil penelitian ini nantinya diharapkan bermanfaat bagi dunia industri manufaktur logam, pemerintah dan perguruan tinggi untuk memecahkan masalah ketergantungan produk asal impor, khususnya peralatan kesehatan ortopedik. Lebih rinci manfaat yang diperoleh dari penelitian ini dari berbagai sisi:

- a. Sistem pahat putar modular nantinya dapat dimanfaatkan oleh industri manufaktur logam dalam memproduksi peralatan kesehatan ortopedik bermaterial *titanium alloy*.
- b. Hasil penelitian ini dapat berkontribusi dalam pengembangan iptek pemesinan material yang sulit dipotong (*difficult to cut material*) lainnya seperti inconel dan magnesium dimana kecenderungan pemanfaatannya meningkat pada industri *aerospace*, turbin dan otomotif.
- c. Dengan kemandirian memproduksi peralatan kesehatan ortopedik bermaterial *titanium alloy* maka pemerintah dapat mengurangi devisa akibat pengurangan impor peralatan kesehatan ortopedik.
- d. Dengan pemanfaatan paket teknologi sistem pahat putar modular dalam pembuatan alat kesehatan ortopedik bermaterial titanium diharapkan proses produksi peralatan kesehatan tersebut menjadi murah dan menghasilkan kualitas yang setara dengan produk impor. Sehingga produk kesehatan ortopedik ini mempunyai daya saing yang tinggi sehingga berpotensi untuk diekspor yang pada gilirannya akan menambah devisa Negara.

BAB IV. METODE PENELITIAN

4.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian tahun kedua ini dilakukan selama 8 (delapan) bulan yaitu dari bulan April 2014 sampai dengan Nopember 2014. Penelitian dilakukan di laboratorium Teknik Produksi dan laboratorium CNC/CAD-CAM Fak. Teknik Universitas Lampung. Selain itu, proses fabrikasi modular *rotary tool holder* dilakukan di laboratorium MEPPPO BPPT Serpong.

4.2 Tahapan Penelitian Tahun Kedua

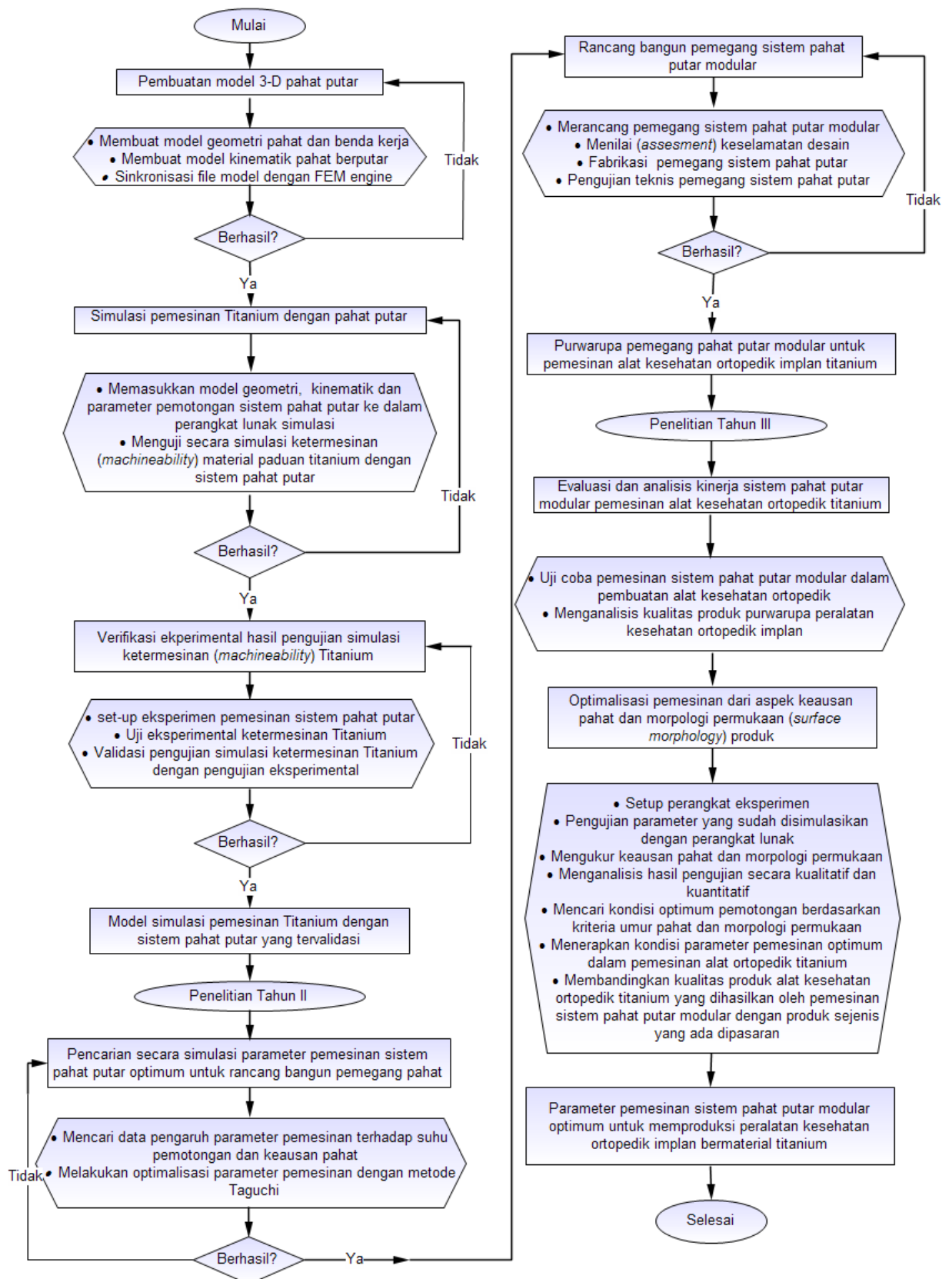
Pada penelitian tahun kedua (2014) dilakukan rancang bangun sistem pahat putar modular untuk pemesian peralatan kesehatan ortopedik bermaterial titanium. Komponen-komponen yang dirancang bangun dalam sistem pemesian pahat putar ini meliputi pemegang pahat putar (*rotary tool holder*) dan sistem penggerakannya. Untuk keperluan rancang bangun tersebut maka parameter rasio antara kecepatan putar dan kecepatan potong dan geometri sistem pahat putar (diameter dan sudut potong pahat) yang optimum ditinjau dari aspek suhu pemotongan dan keausan pahat dicari melalui simulasi proses pemesian dengan sistem pahat putar yang sudah tervalidasi. Serta penilaian (*assesment*) keselamatan desain dalam aspek kekuatan daya tahan terhadap defleksi juga dilakukan. Selain itu pemegang pahat putar juga dirancang berdasarkan metode sistem modular sehingga dapat menangani beberapa jenis proses pemesian peralatan kesehatan ortopedik implan seperti *surface*, *cut*, *grooving*, dan *thread*. Setelah sistem pemegang pahat putar sistem modular untuk pemesian peralatan kesehatan ortopedik berbahan paduan titanium selesai dirancang maka selanjutnya dilakukan fabrikasi.

Adapun detail tahapan kegiatan penelitian untuk mencapai sasaran penelitian tahun kedua diuraikan berikut ini.

Tahapan Penelitian Tahun II

- a. Pencarian parameter pemesian material titanium dan paduannya dengan sistem pahat putar yang optimum yang ditinjau dari aspek suhu pemotongan dan umur pahat melalui simulasi proses pemesian dengan sistem pahat putar yang sudah tervalidasi. Rincian kegiatan pada tahap ini adalah:
 - Melakukan simulasi pemesian material titanium dengan sistem pahat putar untuk mendapatkan data pengaruh parameter pemotongan meliputi diameter pahat, rasio antara kecepatan putar dan kecepatan potong terhadap suhu pemotongan dan keausan pahat.
 - Melakukan optimalisasi parameter pemesian tersebut diatas ditinjau dari aspek suhu pemotongan dan keausan pahat dengan menggunakan metode Taguchi. Data parameter pemesian optimum ini nantinya digunakan dalam perancangan pemegang pahat putar dan sistem penggerakannya.

- b. Perancangan pemegang pahat putar (*rotary tool holder*) modular yang mampu menangani beberapa macam proses pemesinan peralatan kesehatan ortopedik seperti *surface*, *cut*, *grooving*, dan *thread*. Rincian kegiatan pada tahap ini adalah:
- Merancang pemegang pahat putar yang memiliki beberapa modul pahat potong yang dapat menangani proses pemesinan peralatan kesehatan ortopedik *surface*, *cut*, *grooving*, dan *thread*, dengan menggunakan perangkat lunak (*software*) Solidworks. Selain pertimbangan sistem modular pahat potong, rancangan bentuk, dimensi, dan pemilihan elemen penggerak (roda gigi, motor dan lainnya) pemegang pahat putar juga mempertimbangan besarnya hasil optimasi pahat potong, rasio kecepatan pahat dan benda kerja, serta sudut potong pahat.
 - Menilai (*assesment*) keselamatan desain (aspek kekuatan rancangan, dan daya tahan terhadap defleksi) pemegang pahat putar menggunakan perangkat lunak FEA CosmosWork.
 - Membuat *blue print* pemegang pahat putar sistem modular untuk keperluan fabrikasi.
- c. Fabrikasi pahat putar sistem modular berdasarkan rancangan untuk pemesinan peralatan kesehatan ortopedik. Rincian kegiatan pada tahap ini adalah:
- Membuat dan mengadakan komponen-komponen pahat putar sistem modular;
 - Merakit komponen pahat putar sistem modular.
- d. Pengujian teknis pahat putar sistem modular untuk pemesinan peralatan kesehatan ortopedik. Rincian kegiatan pada tahap ini adalah:
- Melakukan pengujian kekakuan sistem pahat putar modular dengan menggunakan *hammer test*.
 - Melakukan pengujian *run out* sistem pahat putar dengan menggunakan *dial indicator*.



Gambar 22. Diagram Alir Penelitian

4.3 Keluaran Penelitian Tahun II

Keluaran Penelitian tahun II ditargetkan untuk mendapatkan purwarupa (*prototype*) pemegang pahat putar (*rotary tool holder*) sistem modular untuk digunakan dalam pemesinan peralatan kesehatan ortopedik implan titanium. Beberapa hasil penelitian ini akan diseminarkan pada Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIII (SNTTM XIII) Sesi Internasional Paper, Oktober 2014, dengan judul paper adalah ***FEM Simulation of Machining AISI 1045 Steel Using Driven Rotary Tool*** (lebih detail lihat lampiran). Selain itu hasil seminar tersebut nantinya akan dipublikasikan pada pada international jurnal “**Key Engineering Materials**” yang diterbitkan oleh Trans Tech. Publication, Swiss.

BAB V. HASIL YANG DICAPAI

5.1 Pencarian Parameter Optimum Pemesinan Material Titanium Ortopedik dengan Sistem Pahat Putar

5.1.1 Simulasi Pemesinan Turning dengan Pahat Berputar untuk Material Titanium Ortopedik

Set-up Proses Simulasi

Sebelum dilakukan proses simulasi pemesinan turning dengan pahat putar untuk material titanium orthopedik, maka parameter masukan dan kondisi pemesinan harus diatur (*setup*) pada pre-processor model software simulasi. Parameter dan kondisi pemesinan tersebut meliputi kecepatan potong V_c , kecepatan putar pahat V_T , tebal pemotongan, dan gerak makan.

Selain itu, kondisi pemesinan juga harus diatur yang meliputi suhu lingkungan, *coolant* dengan koefisien konveksi, faktor *shear friction*, dan koefisien *heat transfer*.

Pengaturan Pahat dan Benda Kerja

Geometri pahat putar (*round tool insert*) yang digunakan dalam simulasi dimodelkan dengan bentuk solid 3D dari Computer Aided Design (CAD) dimana dimensi pahat dan geometri sudut disesuaikan dengan *round tool insert* komersial. Properti pisau pahat yang digunakan dalam simulasi dapat dilihat pada Tabel 11.

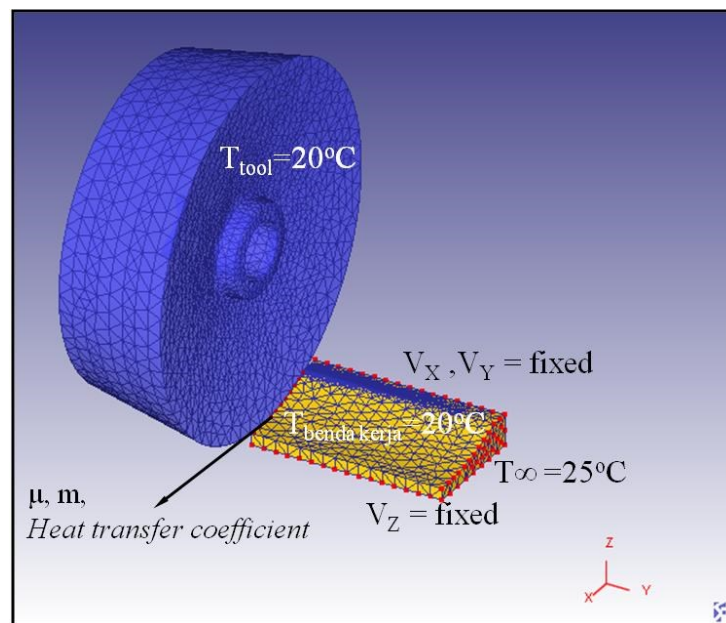
Tabel 11. Properti pisau pahat dan benda kerja

Benda Kerja (<i>Workpiece</i>)	
Jenis Material	Titanium Ortopedik (Titanium Alloy Ti-6Al-4V ELI)
Geometri	Diameter 50mm
Pahat <i>Round Tool Insert</i>	
Jenis Material	Uncoated tungsten carbide, WC-Co
Geometri	Jenis RPMT 1604 MO-BB (Kyocera)
	Sudut relief $\alpha=11^\circ$
Diameter D=16 mm	

Sedangkan geometri benda kerja juga dimodelkan dengan bentuk solid 3D dari sistem CAD. Perangkat lunak (*software*) CAD yang digunakan mampu mendesain properti benda kerja seperti panjang, lebar, dan diameter. Properti benda kerja yang disimulasikan dalam pemesinan *rotary turning* ini dapat dilihat dalam Tabel 11.

Kondisi Batas

Kondisi batas (*boundary condition*) menentukan bagaimana batas suatu objek pahat berinteraksi dengan objek benda kerja (*workpiece*) dan dengan lingkungan. Dalam pemodelan ini, kondisi batas adalah berdasarkan jenis material pahat Carbide dan material benda kerja Titanium Orthopedik dimana yang diberikan adalah (1) suhu awal pahat round tool insert dan workpiece adalah 20°C, (2) shear factor (\bar{m}) dan friction factor (μ) adalah 0.6, (3) koefisien perpindahan panas (*heat transfer coefficient*) pada daerah antar muka (*interface*) pahat dan benda kerja adalah 11 N/s. mm°C, (4) kondisi pendinginan kering dengan koefisien konveksi sebesar 0.02 N/s. mm°C, (5) Suhu lingkungan diasumsikan 25°C, (6) Kecepatan benda kerja dalam arah sumbu X, Y dan Z adalah *fixed*, dan (7) Pahat berputar dan bergerak dalam arah sumbu Y. Ilustrasi dari kondisi batas dalam pemodelan FEM ini dapat dilihat pada Gambar 23.



Gambar 23. Kondisi batas pemodelan pemesinan turning dengan pahat berputar berdasarkan FEM.

Material Pahat Putar dan Benda Kerja

Material benda kerja Titanium Orthopedik (Ti6AL4V) yang digunakan dalam simulasi pemesinan ini, propertinya diambil dari basis data perangkat lunak FEM yang digunakan. Begitupun dengan material pahat Carbide atau WC. Sifat mekanis dan termal dari material benda kerja dan pahat putar dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Sifat mekanik dan thermal serta kondisi batas dalam proses simulasi

Sifat Material Pahat (<i>Uncoating Tungsten Carbide, WC-Co</i>)	
<i>Thermal Conductivity (W/mK)</i>	58.9888
<i>Heat capacity (J/Kg K)</i>	15.0018
<i>Ultimate tensile strength (MPa)</i>	3,000
<i>Modulus of elasticity (GPa)</i>	650
<i>Poisson's ratio</i>	0.25
Sifat Material Benda Kerja Titanium Ortopedik (Ti-6Al-4V ELI)	
<i>Thermal Conductivity (W/mK)</i>	21
<i>Heat capacity (J/Kg C)</i>	660
<i>Ultimate tensile strength (MPa)</i>	860
<i>Modulus of elasticity (GPa)</i>	114
Kondisi Batas	
<i>Suhu awal °C</i>	20
<i>Shear friction factor</i>	0.6
<i>Heat transfer coefficient pada workpiece-tool interface (N/s. mm°C)</i>	50

Mesh Generation

Perangkat Lunak FEM yang digunakan dalam simulasi pemesinan menggunakan kriteria meshing Lagrangian. Lagrangian mesh adalah diformulasikan pada langkah setiap waktu untuk mengatur deformasi material. Jika terjadi simulasi *crash*, maka simulasi baru akan berjalan kembali dimulai pada langkah terakhir dimana simulasi berhenti. Dalam pemodelan berdasarkan Finite Element Method, pembagian benda menjadi beberapa bagian yang disebut meshing adalah hal yang sangat penting. Ukuran mesh yang sangat kecil adalah diperlukan utamanya daerah kontak antara pahat dan benda kerja. Hal ini disebabkan sangat besarnya gradient suhu dan tegangan dalam daerah tersebut selama simulasi pemesinan. Jenis elemen yang digunakan pada pemodelan FEM ini adalah elemen tetrahedral. Diasumsikan bahwa pahat round tool insert adalah kaku (rigid) memotong material benda kerja (workpiece) yang plastis. Untuk memproses mesh round tool insert, jumlah elemen tetrahedral yang diberikan berjumlah 25000 elemen, sedangkan jumlah element tetrahedral yang tersusun dalam benda kerja adalah diberikan 25% dari kecepatan makan (feed rate).

Kontrol Simulasi dan Database Generation

Langkah terakhir dari pre-processor adalah kontrol simulasi yang meliputi jumlah langkah simulasi, jumlah peningkatan langkah yang akan disimpan, dan perhitungan keausan pahat.

Data simulasi yang dimasukkan dalam pre-processor adalah nantinya ditulis sebagai suatu basis data. Basis data ini akan digunakan dalam langkah-langkah selanjutnya dalam menproses data.

5.1.2 Proses Data dari Simulasi Pemesinan

Proses ini adalah post-processor, yaitu proses dimana hasil simulasi dapat diperiksa. Data dari hasil simulasi dengan mudah dapat diambil dari basis data (database) hasil simulasi. Berikut ini data hasil simulasi pemesinan turning dengan pahat berputar untuk material titanium ortopedik yang akan dianalisis untuk keperluan rancang bangun *rotary tool holder* modular.

1. Geometri benda kerja (*workpiece*) dan pahat putar setelah simulasi, gerakan pahat, dan deformasi mesh setiap langkah (*step*).
2. Distribution kondisi variabel (luaran) : tegangan (*stress*), regangan (*strain*), gaya (*force*), suhu (*temperature*), keausan (*wear*), kerusakan (*damage*) dan lain-lain.

Regangan (*strain*) adalah diukur dari derajat deformasi suatu obyek yang dalam simulasi ini adalah obyek benda kerja dan pahat putar. Untuk deformasi yang besar, true strain adalah didefinisikan seperti persamaan berikut ini.

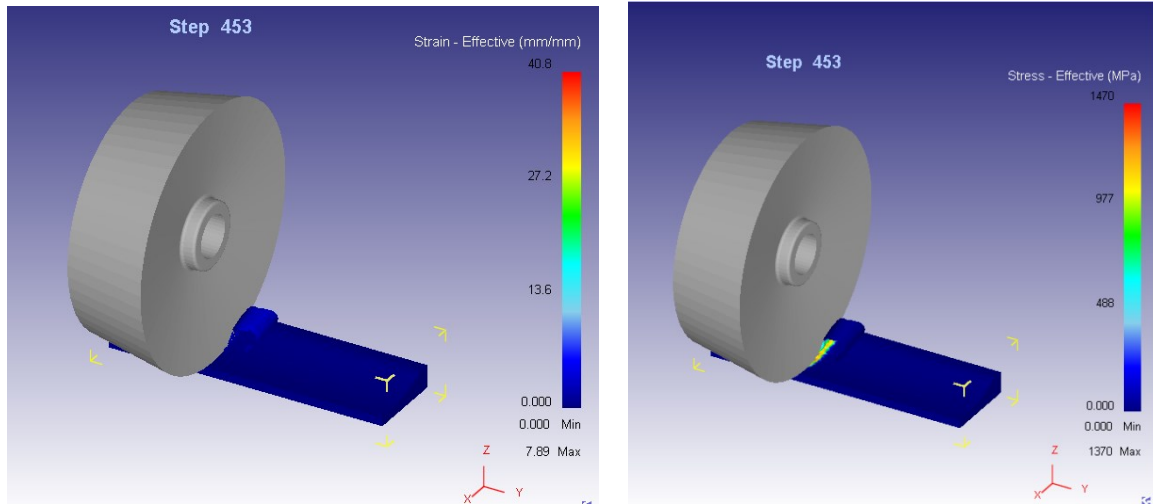
$$\varepsilon = \ln \frac{l_f}{l_0} \quad (9)$$

dimana, ε adalah regangan (*strain*), l_0 adalah panjang mula, dan l_f adalah panjang setelah deformasi. Laju regangan diukur dari laju deformasi terhadap waktu.

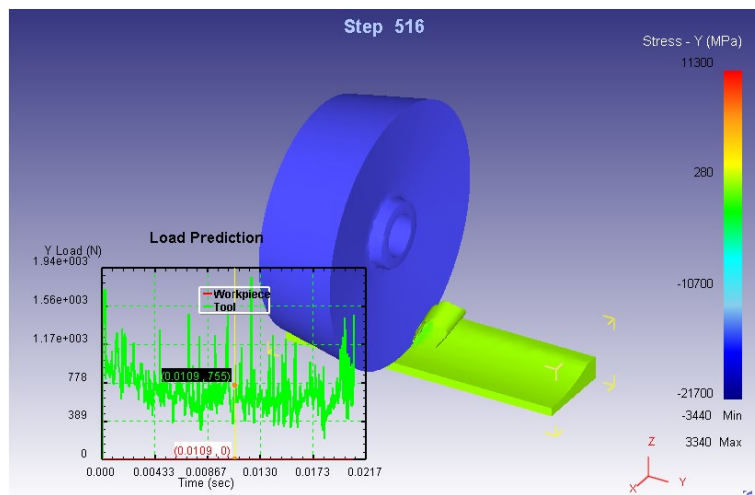
Tegangan (*stress*) didefinisikan sebagai aksi gaya pada unit area material. Tegangan efektif adalah didefinisikan dengan persamaan berikut ini.

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (10)$$

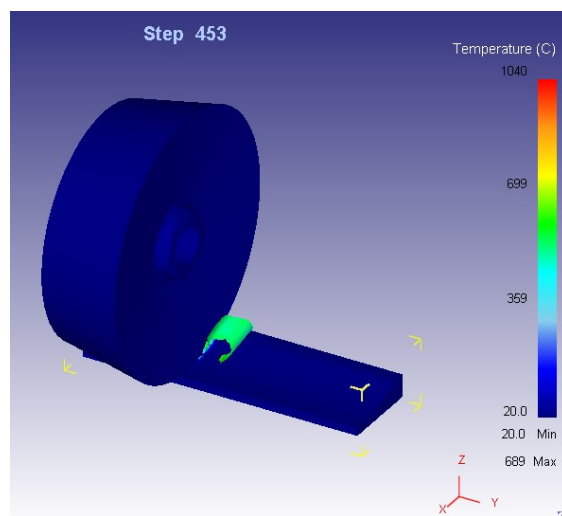
dimana, σ_1 , σ_2 , dan σ_3 adalah tegangan utama. Contoh luaran dari regangan dan tegangan efektif akibat deformasi benda kerja titanium orthopedik dapat dilihat pada Gambar 24. Reaksi gaya yang timbul akibat terjadinya regangan dan tegangan selama proses pemotongan dapat diuraikan menjadi tiga jenis gaya, yaitu gaya potong utama, gaya makan, dan gaya radial. Contoh gaya yang timbul selama proses pemesinan dapat dilihat dalam Gambar 25.a. Selain itu, suhu pemotongan akan timbul akibat deformasi plastis benda kerja menjadi geram, dimana contoh suhu pemotongan yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 25.b.



Gambar 24. Regangan dan tegangan



a. Gaya Pemotongan



b. Suhu Pemotongan

Gambar 25. Gaya dan Suhu Pemotongan

5.1.3 Optimasi Parameter Pemmesinan Material Titanium Ortopedik dengan Metode Taguchi

Investigasi parameter pemmesinan material titanium ortopedik yang optimum dilakukan dengan tiga variasi variabel bebas (*input*), yaitu: diameter pahat potong, kecepatan putar pahat, dan kecepatan potong. Variasi diameter pahat potong mempertimbangkan ketersediaan pahat yang tersedia dipasaran. Oleh karena itu diameter pahat potong yang dipilih adalah dengan ukuran 16, 20 dan 27mm. Untuk variasi kecepatan potong dipilih berdasarkan tingkatan level yaitu rendah (1), tengah (2) dan tinggi (3). Level parameter kecepatan potong tertinggi dipilih sebesar 150 m/min, dimana besaran ini diperoleh dari studi literatur kecepatan potong maksimum untuk pemmesinan material titanium orthopedik [X]. Sedangkan variasi kecepatan potong level rendah dan tinggi adalah dipilih masing-masing 45 dan 75 m/min. Sama seperti parameter kecepatan potong, kecepatan putar pahat adalah juga dipilih berdasarkan tingkatan level yaitu rendah (1), tengah (2) dan tinggi (3). Berdasarkan penelitian pada tahun pertama dalam kasus pemmesinan bubut baja AISI 1045 dengan pahat berputar, dimana diketahui bahwasuhu pemotongan menurun seiring dengan peningkatan ratio kecepatan potong pahat dan benda kerja (V_T/V_C) dalam interval 0 sampai 1, dan kemudian meningkat pada interval selanjutnya. Selain itu, besaran gaya potong utama adalah relatif konstan pada rasio kecepatan potong pahat dan benda kerja pada interval lebih dari 1. Oleh karena itu, kecepatan putar atau potong pahat yang dipilih adalah masing-masing 20, 75, 120 m/min. Disamping parameter pemmesinan yang bervariasi, parameter pemmesinan konstan juga dilibatkan dalam investigasi ini yang meliputi kecepatan makan (*feeding*) 0.2 mm/rev dan tebal pemakanan (*depth of cut*) 1 mm. Kondisi pemmesinan untuk optimasi pemmesinan ini dapat dilihat pada Tabel 13.

Tabel 13. Kondisi pemmesinan untuk optimasi pemmesinan titanium orthopedik

Material Benda Kerja	Titanium Orthopedik (Titanium 6AL4V) Diameter=50mm
Jenis Pahat	Material: Carbide WC Geometry: Normal rake and relief angle $\alpha=11^\circ$
Diameter Pahat, mm	16 ; 20 ; 27
Kecepatan Putar Pahat, m/min	20 ; 75 ; 120
Kecepatan Potong, m/min	45 ; 75 ; 145
Gerak makan, mm/rev	0.2
Tebal pemotongan, mm	1
Cairan Pendingin	Kering

Untuk mendapatkan nilai optimum dari parameter bebas pemmesinan titanium orthopedik, maka parameter bebas tersebut di atas dinilai pengaruhnya terhadap parameter pemmesinan tetap yaitu suhu dan gaya pemotongan. Metode Taguchi digunakan untuk mencari nilai optimum dari parameter bebas. Metode ini digunakan untuk mendesain percobaan yang efisien dan digunakan

untuk menganalisis data percobaan. Keuntungan dari metode ini adalah dapat digunakan untuk menentukan jumlah eksperimen minimal yang dapat memberi informasi sebanyak mungkin semua faktor yang mempengaruhi parameter.

Disain penelitian dengan Metode Taguchi dimulai dengan penentuan faktor dan levelnya. Tabel 14 memperlihatkan Faktor yang dipilih dimana merupakan parameter bebas. Level faktor mengindikasikan tingkatan rendah (1), sedang (2), dan tinggi (3).

Tabel 14. Pemilihan Faktor dan Levelnya

Faktor	Level		
	1	2	3
Diameter Pahat Putar (mm) – A	16	20	27
Kec. Putaran (m/min) – B	20	75	120
Kec. potong (m/min)– C	45	75	150

Setelah pemilihan Faktor dan Levelnya, selanjutnya adalah penentuan jumlah eksperimen yang akan dijalankan.. Orthogonal array L_9 dari Metode Taguchi diaplikasikan untuk menentukan jumlah eksperimen yang dilakukan dalam rangka optimasi parameter bebas pemrosesan bubut material titanium orthopedik dengan pahat berputar. Metode Taguchi dengan susunan orthogonal L_9 maksudnya adalah jumlah sampel yang diamati sebanyak Sembilan sampel, karena 3^{3-1} . Sembilan sampel atau eksperimen akan dilakukan dimana merupakan kombinasi antara Faktor parameter pemrosesan bebas dan Levelnya. Parameter luaran dari eksperimen adalah Respondari perlakuan kombinasi Faktor dan Levelnya, dimana parameter luaran ini meliputi Suhu dan Gaya Pemotongan. Tabel 15 memperlihatkan data hasil eksperimen untuk keperluan optimasi parameter bebas pemrosesan bubut material titanium orthopedik dengan pahat berputar.

Tabel 15. Data hasil eksperimen untuk keperluan optimasi.

Run Eks	Faktor			Respon	
	A	B	C	Suhu (T) °C	Gaya (F) N
1	1	1	1	722.157	683.675
2	1	2	2	813.552	649.536
3	1	3	3	865.575	634.857
4	2	1	2	742.942	752.313
5	2	2	3	824.012	662.158
6	2	3	1	792.293	560.161
7	3	1	3	839.338	794.301
8	3	2	1	725.590	790.852
9	3	3	2	801.303	721.519

Analisa Taguchi Pengaruh Parameter Pemessinan Bebas Terhadap Suhu Pemotongan

Analisa suhu pemotongan pada proses pemessinan titanium ortopedik menggunakan pahat putar, menunjukan bahwa ketiga-tiga faktor parameter pemessinan tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan suhu pemotongan. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 16 tentang analisa varian.

Tabel 16. Analisis Varian Pengaruh Parameter Bebas Terhadap Suhu Pemotongan

Analysis of Variance for Means						
Source	DF	Seq SS	AdjSS	Adj MS	F	P
A	2	338.3	338.3	169.1	0.14	0.879
B	2	4067.7	4067.7	2033.9	1.66	0.376
C	2	14067.3	14067.3	7033.7	5.74	0.148
Residual Error	2	2451.5	2451.5	1225.8		
Total	8	20924.9				

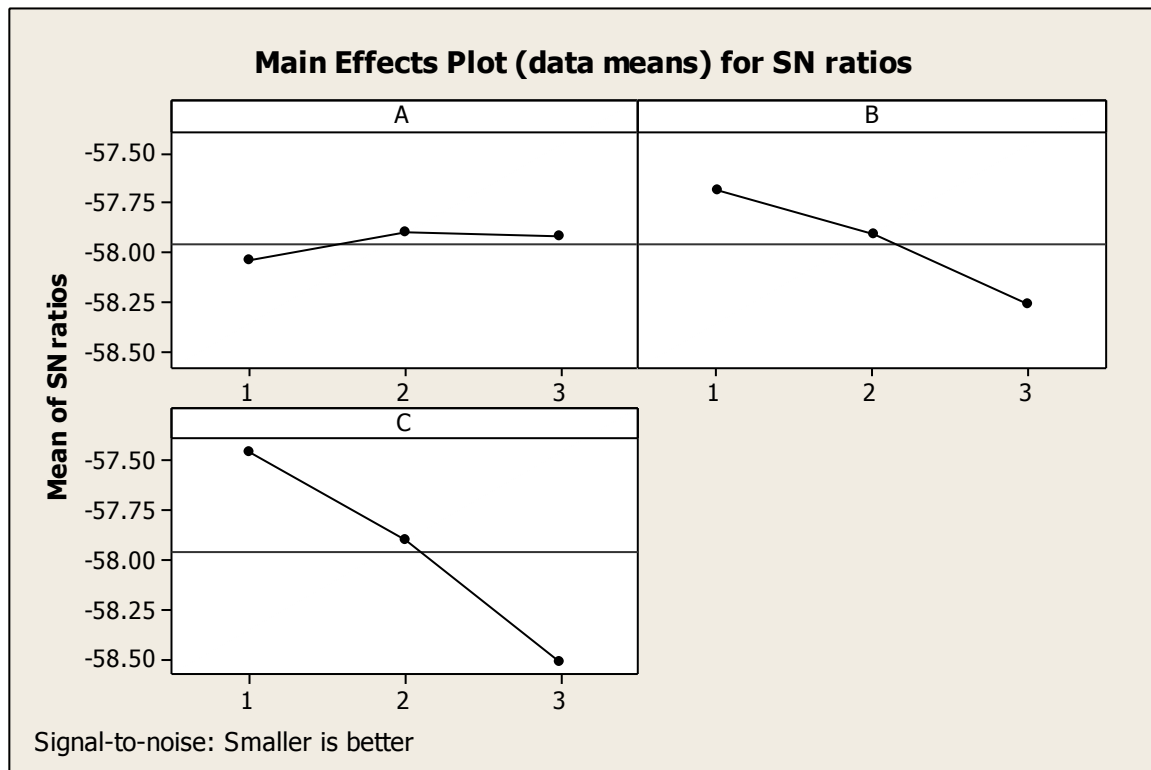
Pada penelitian ini, nilai pengaruh signifikan yang diambil adalah sebesar 5% ($P=0,05$). Dari ketiga faktor parameter pemessinan bebas yang dianalisa, semuanya menunjukan nilai signifikan (P) lebih besar dari 5%. Walaupun ketiga faktor tersebut tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap suhu pemotongan, akan tetapi faktor kecepatan potong memberikan pengaruh yang lebih besar dibandingkan dengan faktor yang lain. Faktor kecepatan potong mempunyai nilai P sebesar 0.148 sedangkan factor kecepatan putaran pahat potong hanya mempunyai besaran nilai $P=0.375$. Dengan demikian fator kecepatan potong memberikan kontribusi yang lebih besar dibandingkan dengan faktor kecepatan putaran pahat dan diameter pahat potong.

Besarnya kontribusi masing-masing faktor juga dapat diamati pada nilai signal to noise yang dihasilkan. Seperti terlihat pada Tabel 17 tentang nilai *signal to noise*, faktor kecepatan potong menempati pengaruh yang lebih besar dibandingkan dengan faktor kecepatan putaran pahat putar dan diameter pahat putar.

Tabel 17. Nilai Signal to Noise Faktor Terhadap Respon Suhu Pemotongan

Response Table for Signal to Noise Ratios			
Smaller is better			
Level	A	B	C
1	-58.04	-57.69	-57.45
2	-57.91	-57.91	-57.90
3	-57.92	-58.27	-58.51
Delta	0.14	0.58	1.06
Rank	3	2	1

Hal yang sama juga dapat digambarkan dalam bentuk grafik sebagai berikut.



Gambar 26. Grafik Nilai Signal to NoiseFaktor Terhadap Respon Suhu Pemotongan

Analisa Taguchi Pengaruh Parameter Pemесinаn Bebas Terhadap Gaya Pemotongan

Analisa gaya pemotongan pada proses pemесinаn titanium ortopedik menggunakan pahat putar, juga menunjukkan bahwa ketiga-tiga faktor parameter pemесinаn tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan gaya pemotongan. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 18 tentang analisa varian.

Tabel 18. Analisis Varian Pengaruh Parameter Bebas Terhadap Gaya Pemotongan

Analysis of Variance for SN ratios						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	2	3.8628	3.8628	1.9314	4.28	0.190
B	2	2.7610	2.7610	1.3805	3.06	0.247
C	2	0.2981	0.2981	0.1491	0.33	0.752
Residual Error	2	0.9034	0.9034	0.4517		
Total	8	7.8254				

Sama seperti pengujian suhu pemotongan, nilai pengaruh signifikan yang diambil adalah sebesar 5% ($P=0,05$). Dari ketiga faktor pemесinаn yang dianalisa, semuanya juga menunjukkan nilai signifikan (P) lebih besar dari 5%. Walaupun ketiga faktor tersebut tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap gaya pemotongan, akan tetapi faktor diameter pahat putar memberikan pengaruh yang lebih besar dibandingkan dengan faktor yang lain. Faktor diameter pahat putar mempunyai nilai P sebesar 0.190 sedangkan faktor kecepatan putaran pahat potong hanya

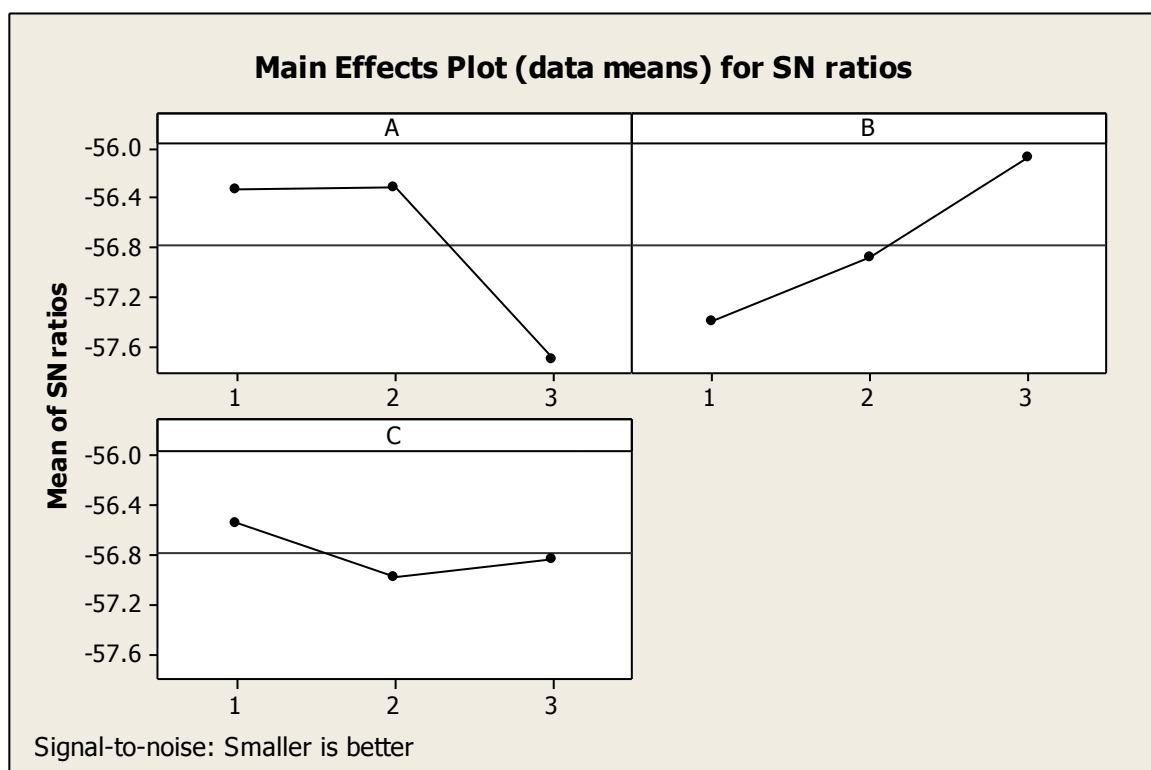
mempunyai besaran nilai $P=0.247$ dan faktor kecepatan potong sebesar 0.752. Dengan demikian faktor diameter pahat putar memberikan kontribusi yang lebih besar terhadap perubahan gaya pemotongan dibandingkan dengan faktor kecepatan putaran pahat dan diameter kecepatan potong. Besarnya kontribusi masing-masing faktor juga dapat diamati pada nilai signal to noise yang dihasilkan, lihat Tabel 19. Faktor diameter pahat putar memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap perubahan gaya pemotongan dibandingkan dengan faktor kecepatan putaran pahat putar dan kecepatan potong.

Tabel 19. Nilai Signal to Noise Faktor Terhadap Respon Gaya Pemotongan

Response Table for Signal to Noise Ratios
Smaller is better

Level	A	B	C
1	-56.33	-57.41	-56.54
2	-56.30	-56.88	-56.98
3	-57.71	-56.06	-56.82
Delta	1.40	1.35	0.44
Rank	1	2	3

Hal yang sama juga dapat digambarkan dalam bentuk grafik sebagai berikut.



Gambar 27. Grafik Nilai Signal to Noise Faktor Terhadap Respon Gaya Pemotongan

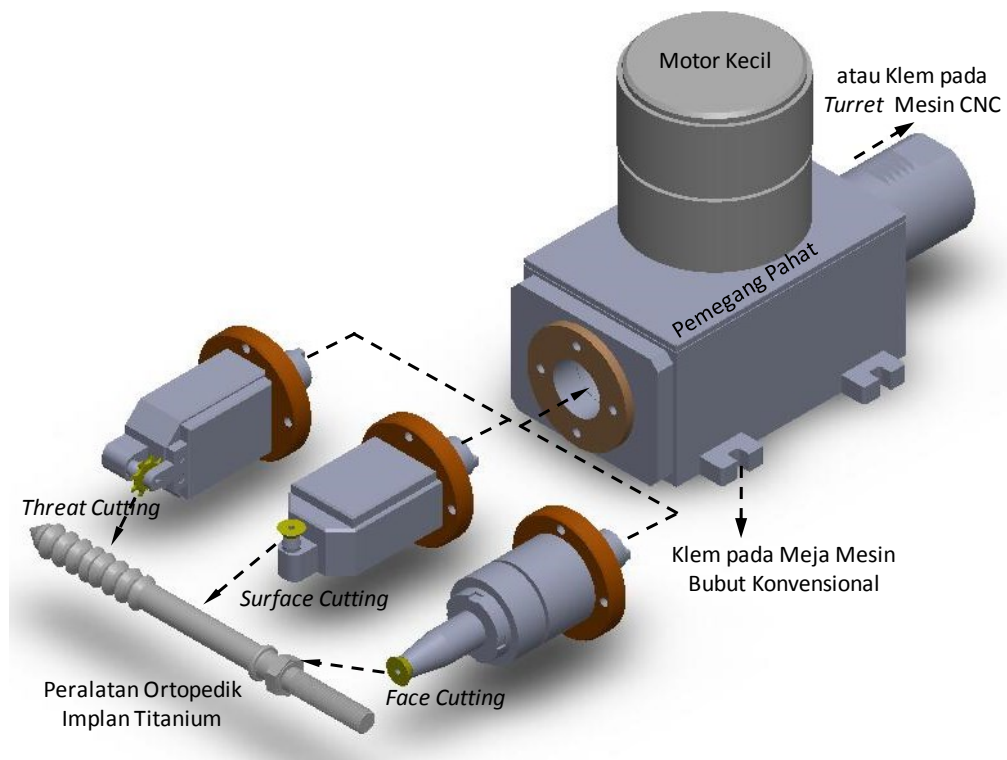
Dari hasil analisa di atas, ada beberapa hasil yang akan digunakan untuk dipertimbangkan dalam proses rancangan, yaitu sebagai berikut:

1. Variasi parameter pemesinan diameter pahat paling berpengaruh terhadap perubahan gaya pemotongan dibandingkan kecepatan putar pahat dan kecepatan potong. Diameter pahat yang kecil berakibat pada penurunan gaya pemotongan, tetapi tidak signifikan pengaruhnya terhadap kenaikan suhu pemotongan. Oleh karena itu diameter benda kerja yang optimum untuk dipilih dalam rancangan adalah level rendah yaitu 16 mm. Selain alasan teknis tersebut, juga harga diameter pahat putar ukuran kecil yang tersedia di pasaran relatif lebih murah.
2. Variasi parameter pemesinan kecepatan potong paling berpengaruh terhadap perubahan suhu pemotongan dibandingkan kecepatan putar pahat dan diameter pahat potong. Peningkatan kecepatan potong berakibat pada peningkatan suhu pemotongan tapi tidak signifikan. Disisi lain itu berakibat pada peningkatan produktivitas pemesinan. Oleh karena itu, kecepatan potong optimum yang dipertimbangkan dalam rancangan nantinya adalah level yang tinggi yaitu 150 m/min.
3. Variasi kecepatan putar pahat tidak signifikan pengaruhnya terhadap perubahan gaya dan suhu pemotongan. Selain itu, suhu pemotongan menurun seiring dengan peningkatan ratio kecepatan putar pahat dan kecepatan potong benda kerja (V_T/V_C) dalam interval 0 sampai 1. Oleh karenanya kecepatan putar pahat optimum yang dipertimbangkan dalam perancangan adalah level yang tinggi yaitu 120 m/min.

5.2 Perancangan Pahat Putar (*Rotary Tool*) Modular

5.2.1 Konsep Rancangan

Konsep rancangan dari sistem pahat putar untuk pemesinan peralatan orthopedik implan titanium adalah sistem modular seperti dilihat pada Gambar 28. Tiga modul pahat putar bisa saling dipertukarkan (*inter-changeability*) dalam rangka pemesinan peralatan ortopedik implan titanium. Ketiga modul itu adalah *surface cutting*, *threath cutting*, dan *face cutting*. Batasan yang harus diperhatikan dalam rancangan ini adalah (1) sistem pemegang pahat putar modular ini dimodifikasi supaya dapat dipasang pada *tool post* standar mesin bubut (*turning*) seperti terlihat pada Gambar 29, dan (2) karena ketersediaan ukuran *bearing* yang terbatas di pasaran maka ukuran diameter maksimum pahat *round tool insert* yang akan digunakan adalah 20 mm.



Gambar 28. Konsep rancangan sistem pemegang pahat putar modular

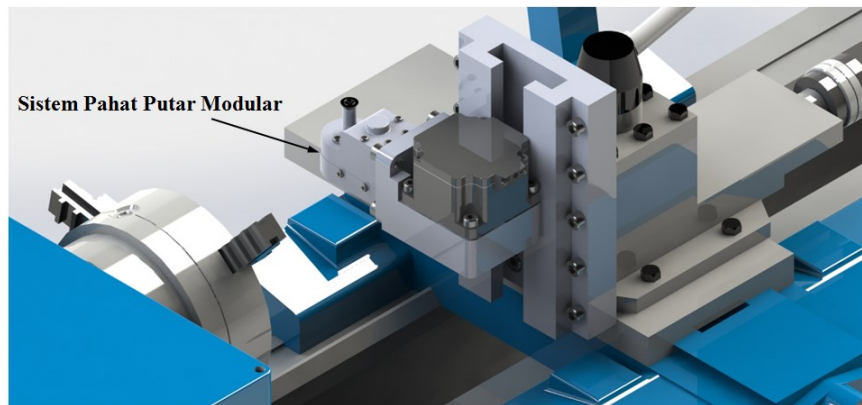
5.2.2 Pertimbangan Rancangan

Selain batasan seperti disebutkan di atas, ada beberapa pertimbangan yang diberikan dalam perancangan sistem pemegang pahat putar ini seperti diuraikan berikut ini.

Persyaratan Dasar

Dalam perancangan ini ada beberapa persyaratan dasar yang harus dipertimbangkan diantaranya adalah:

1. Dalam rancangan struktur, sistem pahat putar harus sederhana dan mempunyai struktur yang kompak. Hal ini disebabkan keterbatasan area pada mesin perkakas. Selain itu struktur pemegang pahat putar harus kaku untuk menghindari defleksi dan geteran.
2. Dalam proses manufaktur, fabrikasi pemegang pahat putar harus presisi dan mudah dirakit.
3. Jangkauan variabel kecepatan putar pahat sampai 120 m/min sesuai pertimbangan parameter pemesinan yang optimum untuk material titanium orthopedik.



Gambar 29. Penempatan sistem pahat putar modular pada mesin bubut

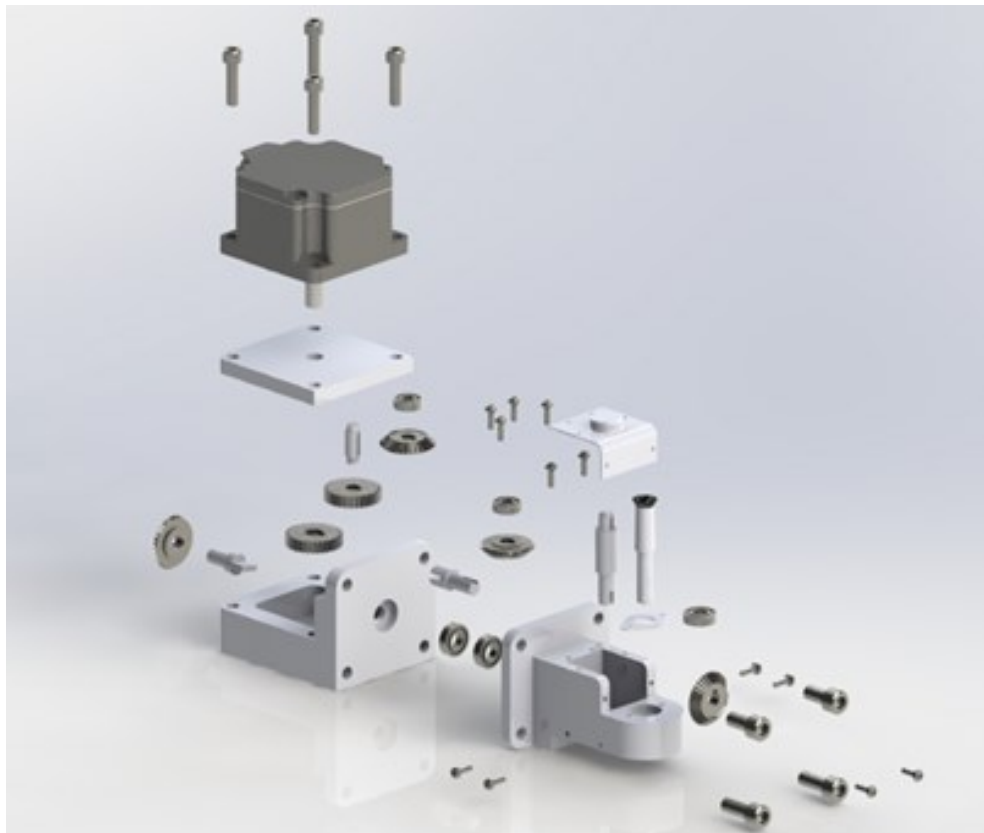
Arrangement Design

Round tool insert yang digunakan dalam penelitian ini adalah yang tersedia di pasaran seperti yang dibuat oleh Kyocera atau pabrikan yang lain. Insert yang dilibatkan dalam rancangan adalah *uncoated tungsten carbide* (WC-Co) dan mempunyai minimum diameter luar 16 mm dan diameter lubang dalam sebesar 5 mm. Round tool insert didudukan pada ujung poros pemegangan pahat yang bermaterial *Tool Steel*, dan diikat dengan baut. Kemudian poros pemegang pahat ini diikat pada suatu spindle pahat (*mandrel/chuck*), dimana sistem spindle ini pasang pada poros yang didukung oleh dua jenis bantalan atau bearing. Kedua jenis bearing itu adalah *ball bearing* untuk menahan gaya radial dan satu *trust bearing* untuk menahan beban aksial. Spindel poros diputar oleh motor DC dengan power 90 Watt dan kecepatan 2000 rpm, sesuai dengan kecepatan putar pahat yang optimum. Mekanisme putaran poros melalui sistem roda gigi untuk menghindari terjadinya slip. Kecepatan putar motor adalah dikontrol oleh speed kontrol unit sehingga variasi kecepatan putar pahat bisa dipilih. *Arrangement design* dari sistem pahat putar ini bisa dilihat pada gambar 30.

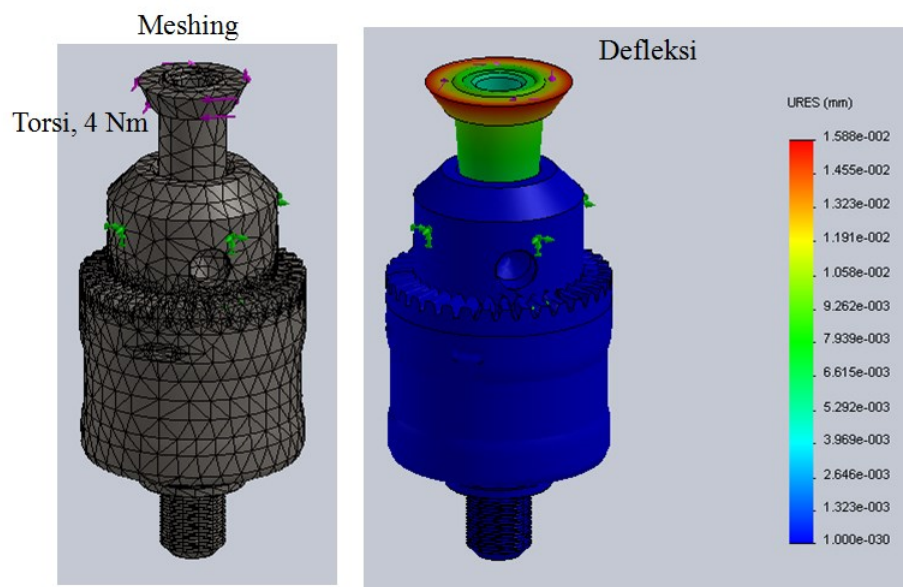
Embodiment Design

Setelah dilakukan *arrangement design*, maka komponen yang kritikal harus diuji kekuatan dan defleksinya. Dalam perancangan sistem pahat putar ini, defleksi dari ujung poros *tool holder* dimana round tool insert diletakkan adalah menjadi perhatian utama. Defleksi poros tool holder langsung mempengaruhi kesalahan diametral benda kerja (*workpiece*) dan juga kekakuan pahat. Oleh karena itu, suatu penilaian secara kuantitatif defleksi dari poros round tool insert dilakukan dengan metode *Finite Element Analysis* menggunakan perangkat lunak CosmosWork. Material poros *tool holder* dipilih terbuat dari Tool Steel yang mempunyai modulus elastisitas, E sebesar 2.03×10^{11} Pa dan torsi yang bekerja pada pahat round tool insert (lihat gambar 31) diasumsikan sebesar 4 N.m, dimana nilai ini diperoleh dari 6.25 kali nilai torsi rata-rata dari penelitian sebelumnya (Harun, 2008). Hasil analisis defleksi poros *tool holder* dapat dilihat pada Gambar 31.

Hasil dari pengujian ini menunjukkan bahwa defleksi maksimum sebesar 0.015, dimana adalah lebih kecil dari tebal pemotongan secara umum. Selain itu diasumsikan bahwa poros *round tool insert* relatif kuat untuk menahan beban karena faktor keamanan rancangan sekitar 6.



Gambar 30. Contoh *Arrangement Design* Sistem Pahat Putar Modul surface cutting



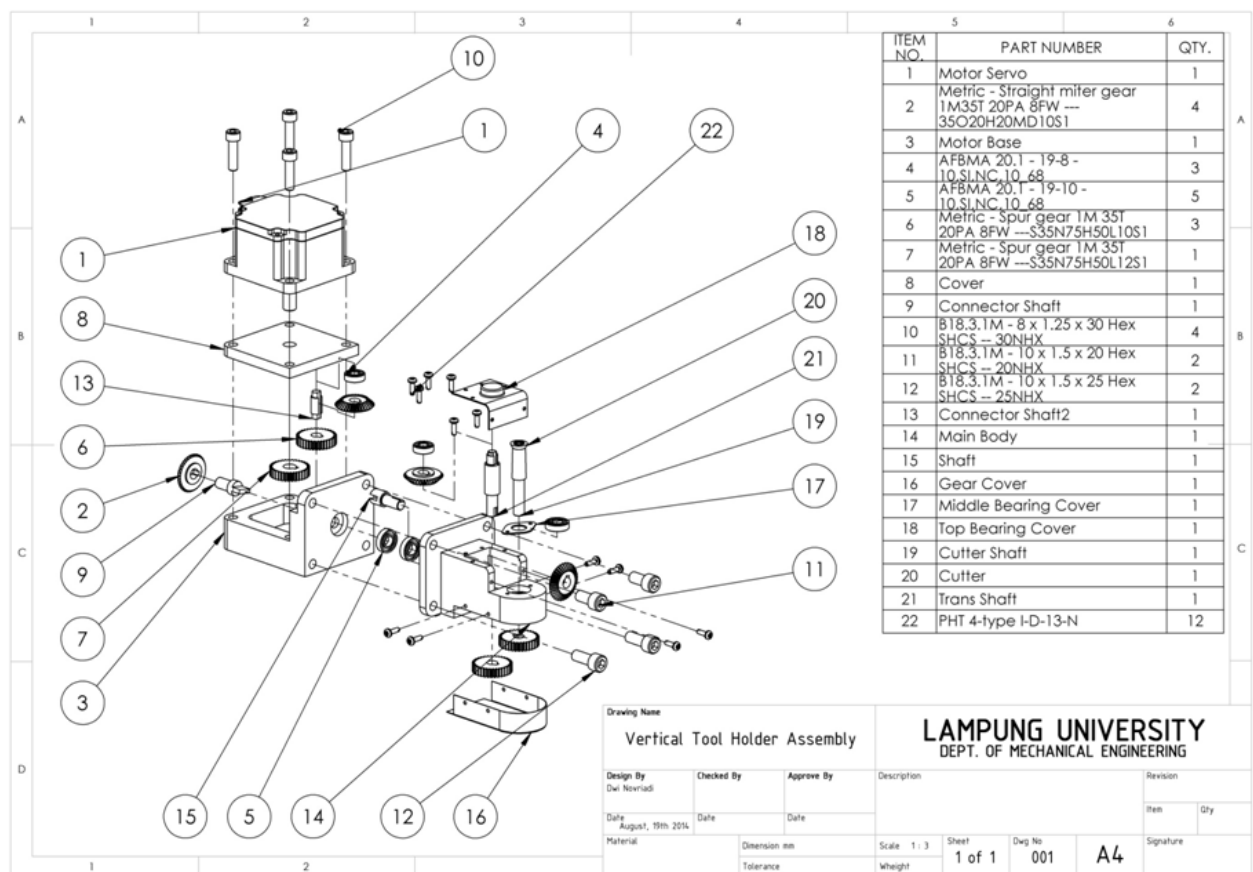
Gambar 31. Analisis Defleksi poros *tool holder* dan hasilnya

5.1.2 Detail Rancangan

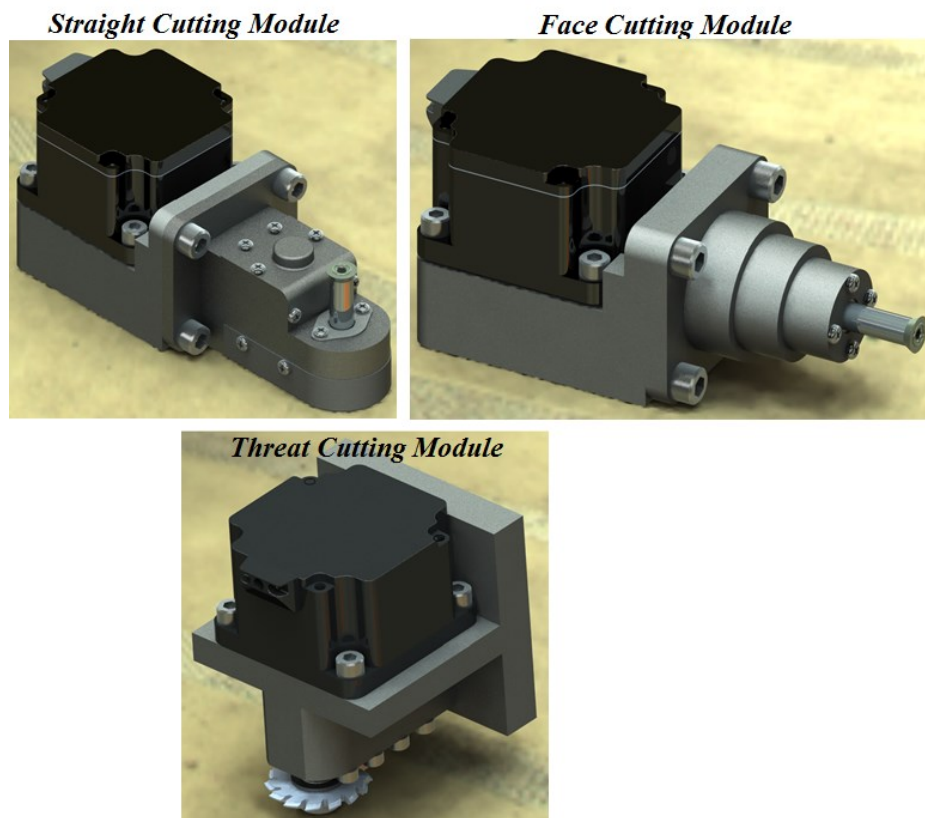
Setelah melewati tahap pertimbangan rancangan maka detail rancangan dari sistem pahat putar yang dituangkan dalam cetak biru atau *blue print*, seperti terlihat pada contoh gambar 32. Cetak biru ini mengandung beberapa informasi seperti jenis material komponen, bentuk komponen dan perakitan, ukuran komponen dan perakitan, dan toleransi yang diberikan.

5.3 Pabrikasi dan Pengujian Sistem Pahat Putar Modular

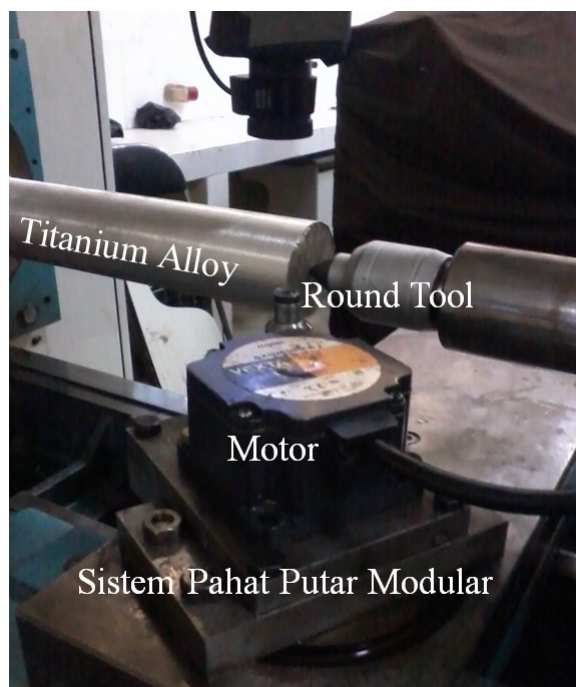
Selanjutnya dilakukan fabrikasi sistem pemegang pahat putar berdasarkan *blue print*. Bentuk hasil pabrikasi dari tiga modul yaitu *straight*, *face*, dan *threath* cutting dapat dilihat pada Gambar 33. Ketiga modul tersebut kemudian ditempatkan pada tool post dari suatu mesin, seperti terlihat pada Gambar 34.



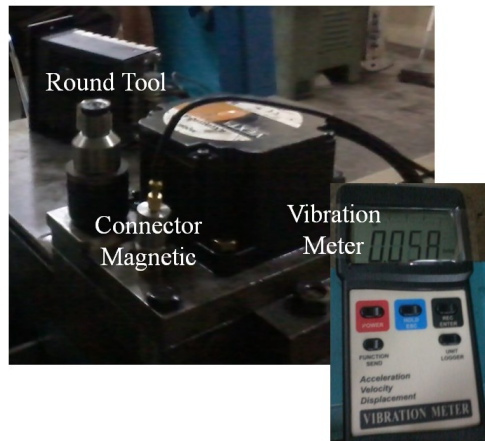
Gambar 32. Cetak Biru Rancangan



Gambar 33. Bentuk sistem pahat putar modular yang sudah dipabrikasi



Gambar 34. Penempatan sistem pahat putar modular pada mesin bubut



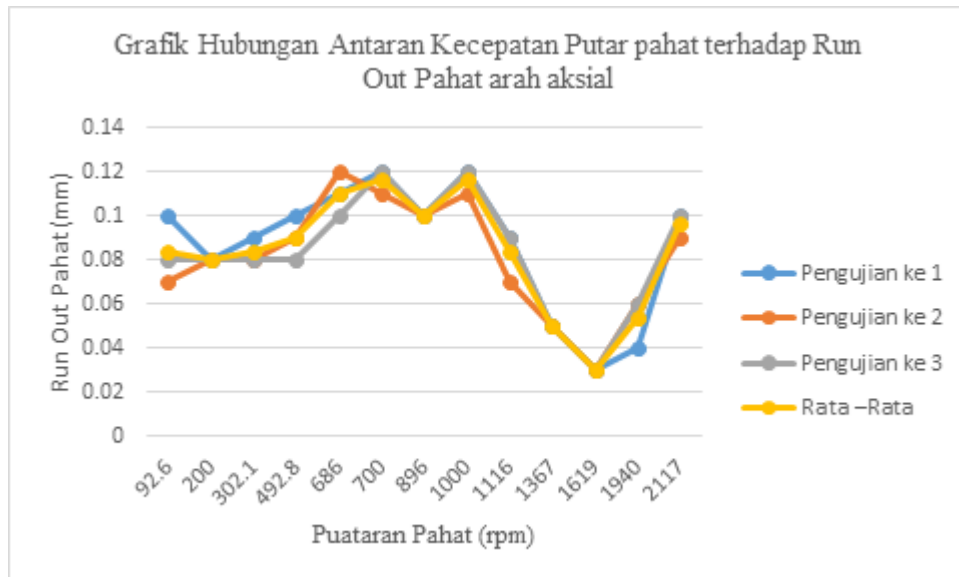
a. Uji Getaran



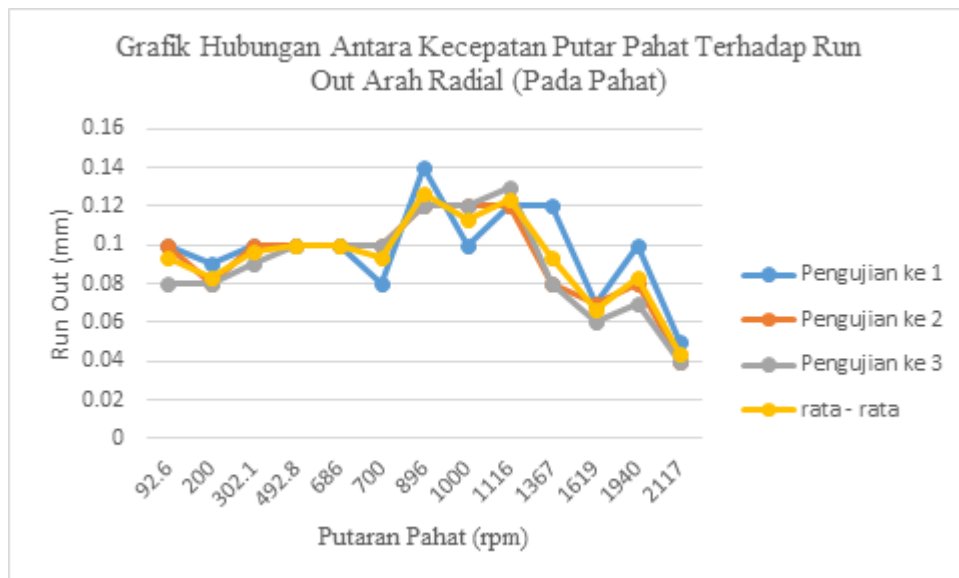
b. Uji Run Out

Gambar 35. Setup Pegujian Getaran dan Run Out

Setelah pabrikan selesai dilakukan maka langkah penelitian selanjutnya adalah pengujian teknis sistem pahat putar modular. Pengujian teknis ini meliputi uji kekakuan atau getaran dan *run out*. Setup pengujian getaran struktur dan run out tool dapat dilihat pada Gambar 35. Pengukuran getaran atau kekakuan menggunakan alat ukur *Vibration Meter Lutron*. Untuk mendapatkan modus getar struktur dari sistem pahat putar, maka ada dua parameter yang diukur, yaitu *velocity* dan *displacement*. Sedangkan pengukuran *run out* menggunakan alat ukur *Dial Indicator Mitutoyo* dengan tingkat akurasi 0.01mm. Ada dua jenis *run out* yang diukur, yaitu radial dan aksial *run out*. Khusus untuk pengukuran radial *run out*, lokasi pengujian ditempatkan pada dua daerah yaitu *tool holder* dan *round tool*.



a. Run out aksial



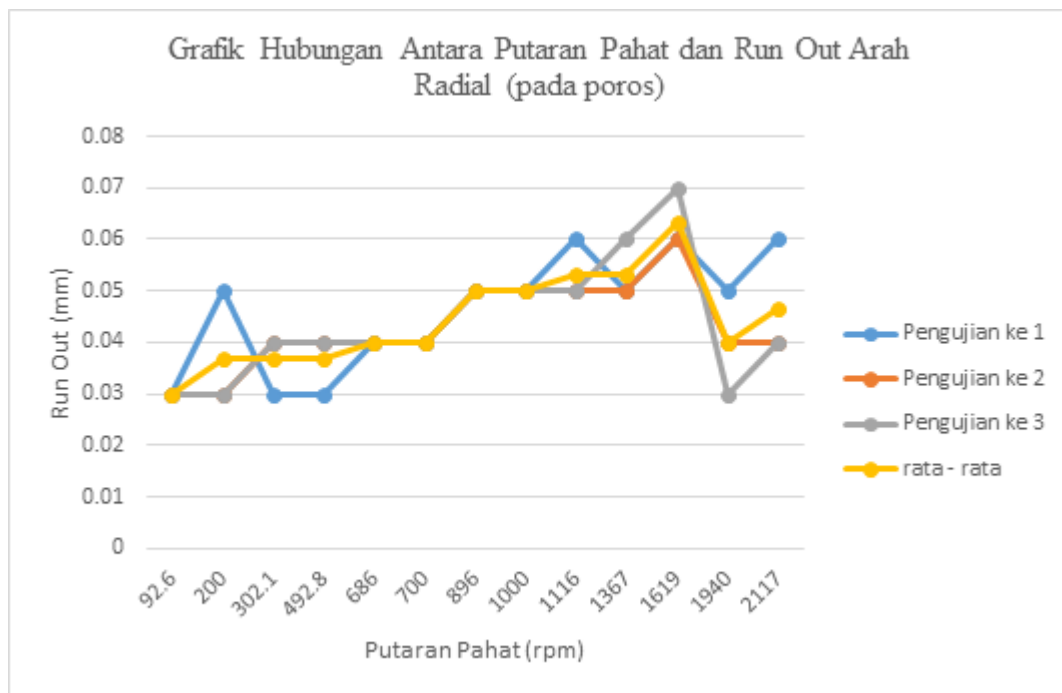
b. Run out radial

Gambar 36. Grafik pengujian kecepatan putar terhadap run out pahat putar

Gambar 36 menunjukkan grafik hasil pengujian run out pahat arah aksial dan radial terhadap putaran pahat sampai dengan 2000rpm.

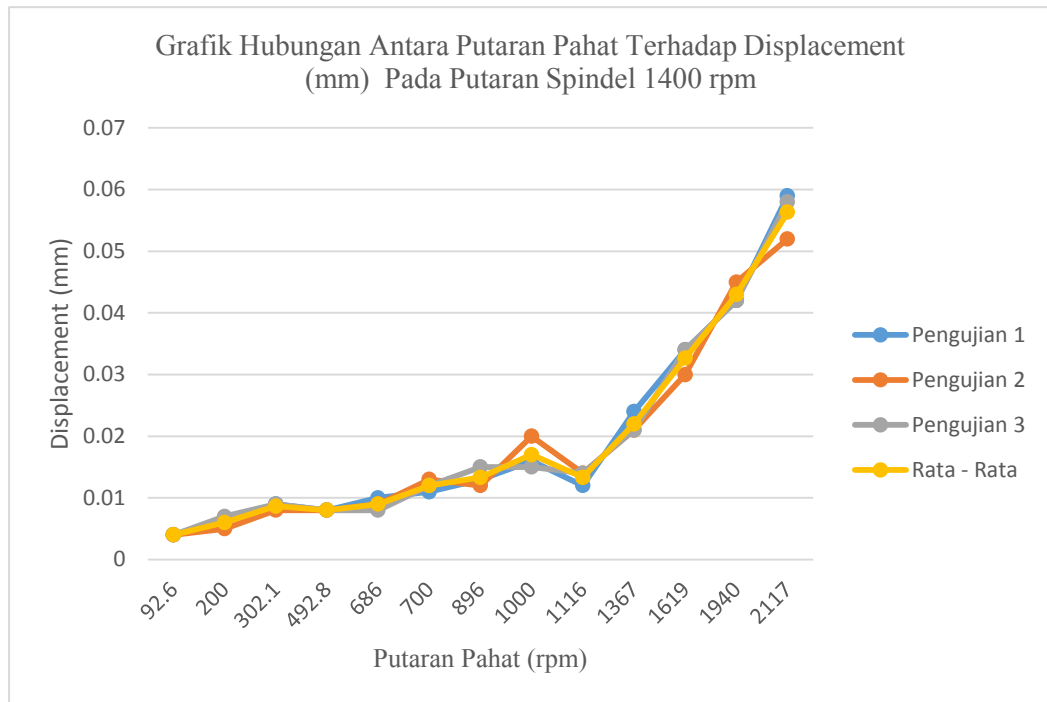
Dari hasil itu terlihat bahwa nilai *run out* aksial maksimum pada daerah *tool cutting edge* adalah sekitar 0.12mm (lihat gambar 36.a), sedangkan nilai run out radial maksimum adalah sekitar 0.14mm (lihat gambar 36.b). Khusus pada daerah pemegang pahat (*tool holder*), nilai *run out* arah radial relatif rendah yaitu 0.07mm (lihat gambar 37). Dan jika dibandingkan dengan nilai *run out* radial pada daerah *tool cutting edge* seperti yang sudah disebutkan di atas, maka nilai *run out* pada daerah pemegang pahat ini relatif lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa pekerjaan pabrikan pemegang pahat (*tool holder*) adalah cukup presisi. Di sisi lain, ini mengindikasikan bahwa

kebulatan pahat tidak sempurna 100% yang kemungkinan disebabkan oleh pabrikasi dari *round tool* yang beredar dipasaran tidak terlalu presisi kebulatannya. Bagaimanapun hasil *run out* ini akan diuji pengaruhnya khususnya terhadap *surface roughness* pada penelitian tahun ketiga nanti.

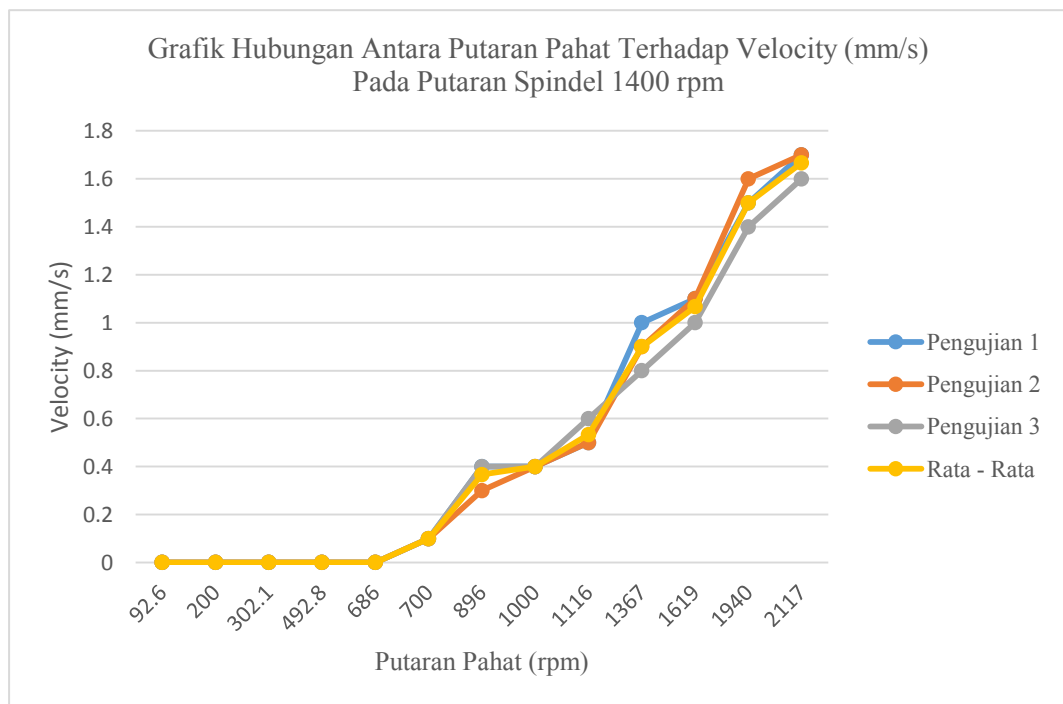


Gambar 37. Grafik pengujian kecepatan putar terhadap run out pada pemegang pahat

Gambar 38 menunjukkan grafik hasil pengujian vibrasi dari struktur system pahat putar. Parameter yang diukur dalam pengujian adalah kecepatan getar atau *velocity* (mm/s) dan *displacement* (mm). Dari hasil pengujian terlihat bahwa kecepatan getar dan displacement meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan putar pahat. Modus getar sistem pahat putar modular pada kecepatan putar pahat maksimum, 2000 RPM adalah relatif rendah yaitu hanya sekitar 29Hz. Ini menunjukkan bahwa struktur relati pahat putar modular ini mempunyai sifat kekakuan yang tinggi. Juga, nilai getaran ini sangat kecil dari nilai ambang batas vibrasi struktur yang diijinkan, yaitu 4kHz.



a. Grafik pengujian displacement



b. Grafik pengujian kecepatan getar

Gambar 38. Grafik pengujian vibrasi atau getaran struktur pahat putar

BAB VI. RENCANA TAHAPAN BERIKUTNYA

Pada penelitian tahun ketiga (2015), setelah dilakukan rancang bangun purwarupa sistem pahat putar modular untuk pemesian peralatan kesehatan ortopedik bermaterial titanium maka akan dilakukan evaluasi hasil rancang bangun peralatan sistem pahat putar modular untuk pemesian peralatan kesehatan ortopedik implan titanium dan optimalisasi parameter pemesian ditinjau dari aspek keausan pahat dan morfologi permukaan (*surface morphology*) produk. Secara detail tahapan kegiatannya adalah sebagai berikut:

Tahapan Penelitian Tahun III

- a. Evaluasi dan analisis kinerja sistem pahat putar modular untuk pemesian peralatan kesehatan ortopedik berbasis material paduan titanium. Rincian kegiatan pada tahap ini adalah:
 - Melakukan uji coba pemesian material paduan titanium menggunakan sistem pahat putar modular dalam rangka membuat purwarupa (*prototype*) peralatan kesehatan ortopedik implan.
 - Menganalisis kualitas produk purwarupa peralatan kesehatan ortopedik implan yang dihasilkan dari pemesian dengan sistem pahat putar modular dalam aspek bentuk dan dimensi.
- b. Optimalisasi parameter pemesian ditinjau dari aspek keausan pahat dan morfologi permukaan (*surface morphology*) produk.
 - *Setup* perangkat eksperimen pemesian titanium dan paduannya dengan sistem pahat putar modular.
 - Menguji parameter pemesian meliputi kecepatan potong, kecepatan makan, dan tebal pemotongan terhadap aspek morfologi permukaan (*surface roughness* dan ukuran partikel) dan keausan pahat.
 - Mengukur keausan pahat dengan *tool maker microscope*, *surface roughness* dengan *surface tester*, dan ukuran partikel dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM).
 - Menganalisis hasil pengujian pengaruh parameter pemesian terhadap umur pahat, kekasaran permukaan dan ukuran partikel secara kualitatif dan kuantitatif.
 - Mencari kondisi optimum pemotongan berdasar kriteria umur pahat dan *surface morphology* dengan metode Taguchi.
 - Menerapkan kondisi parameter pemesian optimum dalam pemesian purwarupa peralatan kesehatan ortopedik implan bermaterial titanium dan paduannya.

- Membandingkan kualitas dimensi, bentuk dan *surface morphology* produk alat kesehatan ortopedik titanium implan yang dihasilkan melalui pemesinan sistem pahat putar modular dengan produk sejenis yang ada dipasaran.

BAB 7. KESIMPULAN DAN SARAN

Setelah tahun kedua penelitian yang berjudul Rancang Bangun Sistem Pahat Putar Modular (Modular Rotary Tool System) Untuk Pemesinan Material Alat Kesehatan Ortopedik (Titanium Alloy) selesai dilakukan, maka berikut ini kesimpulan yang bisa diambil, yaitu:

Hasil utama yang diperoleh pada tahun kedua ini adalah diperolehnya purwarupa peralatan sistem pahat putar modular untuk pemesinan alat kesehatan ortopedik implan titanium yang dirancang berdasarkan optimasi parameter pemesinan material titanium ortopedik. Dari hasil pengujian diketahui bahwa purwarupa atau peralatan ini mempunyai *run out* yang relatif kecil yaitu maksimum sekitar 0.1mm. Juga, getarannya pada kecepatan putar pahat maksimum adalah relatif rendah yaitu hanya sekitar 29Hz, dimana nilai getaran ini sangat kecil dari nilai ambang batas yang diijinkan, yaitu 4kHz. Ini menunjukkan bahwa struktur system pahat putar modular yang dipabrikasi ini mempunyai sifat kekakuan yang tinggi sehingga dapat menjamin kepresisian dari pemesinan atau pembuatan alat kesehatan ortopedik bermaterial titanium.

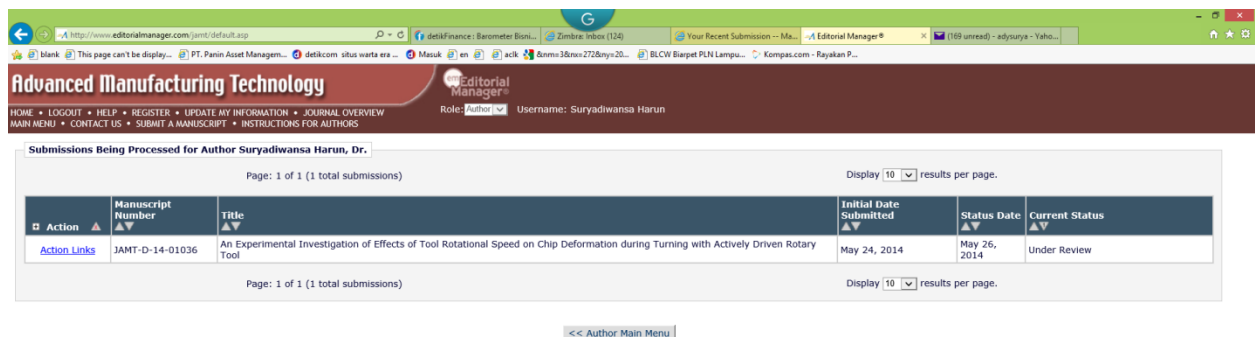
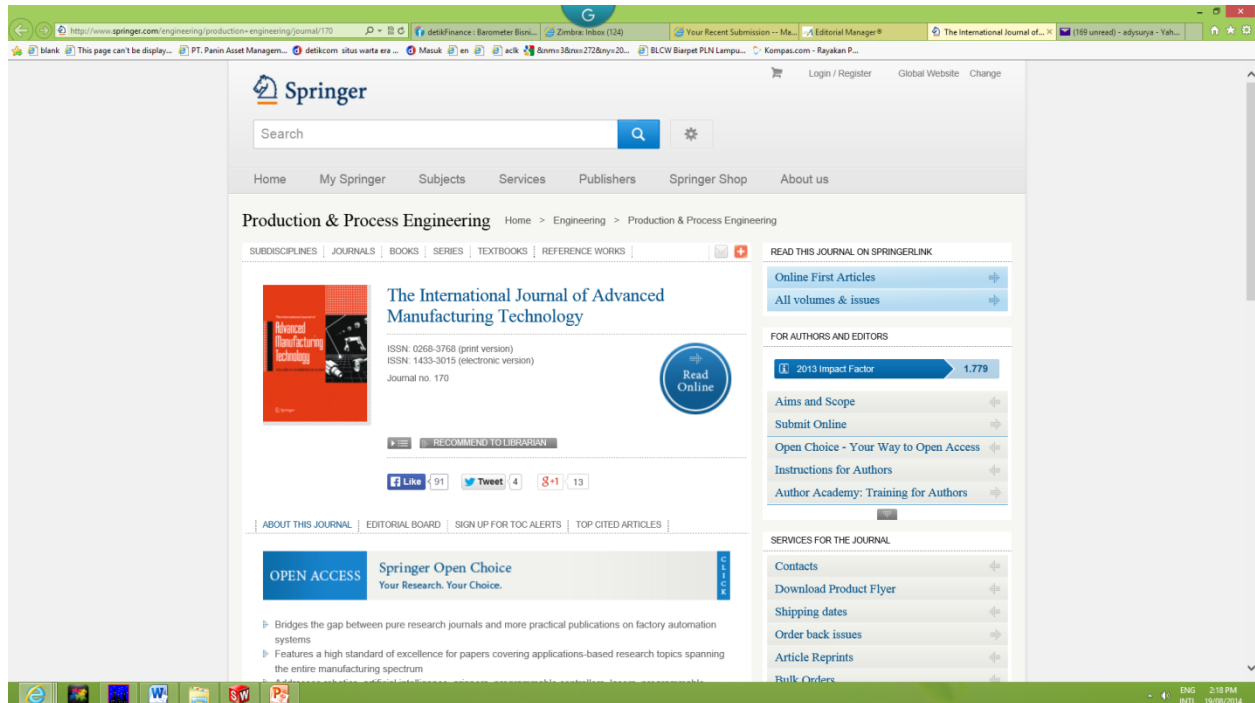
Adapun saran dalam penelitian ini adalah sebaiknya pendanaan penelitian dimulai awal tahun sesuai dengan jadwal pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Perdagangan Nasional Republik Indonesia, 2008, Laporan Tahunan
- [2] www.titanium.com.sg/TitaniumforMedicalApplication, diakses tanggal 26 Nopember 2011 jam 12.04 WIB.
- [3] Ibrahim, 2009, Surface Integrity of Ti-6Al-4V ELI when machined using coated carbide tools under dry cutting condition. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 92-97, 2009.
- [4] <http://www.supraalloys.com/medical-titanium.php>, diakses tanggal 20 Maret 2012 jam 17.04 WIB.
- [5] Frank, M.C., 2008, Rapid Manufacturing in Biomedical Materials: Using Subtractive Rapid Prototyping for Bone Replacement, J Am Acad Orthop Surg October 2011; 19:644-647.
- [6] Bene, J., 2006, Machining Titanium Implants, NTMA Precesion online magazine
- [7] Bejjani, R., 2011, Machinability and Chip Formation of Titanium Metal Matrix Composites, International Journal of Advanced Manufacturing System, Volume 13 Issue 1
- [8] Oshida, 2010, Dental Implant Systems, International Journal ofMolecular Sciences, Vol. 11, 1580-1678.
- [9] Harun, S., 2009, Cutting Temperature Measurement in Turning with Actively Driven Rotary Tool.Key Engineering Materials. Vols. 389-390, pp. 138-14.
- [10] Harun, S., 2008, Study Cutting Mechanics of Turning with Actively Driven Rotary Tool. The Journal of Advanced Mechanical Design, System and Manufacturing.Vol.2 No. 4, pp. 579-586.
- [11] S. Harun, 2009, Turning with Actively Driven Rotary Tool, Reseach Report, Mori Seiki – Kobe University.
- [12] Oxley, P.L.B., Mechanics of Machining: An Analytical Approach toAssessing Machinability, Ellis Horwood, Chichester, West Sussex, pp.223-227, 1989
- [13] Yanuar, B., Suryadiwansa, H., dan Arinal, H., 2010, Effect of Cutting Speed Variation on Temperature when Drilling AISI1045: Simulation and Experiment, Jurnal Mechanical, Vol. 1 No. 1, pp. 45-50
- [14] S. Harun dkk, 2012, Laporan Penelitian Strategis Nasional Tahun Pertama Tahun Anggaran 2013.

LAMPIRAN

Lampiran 1: Jurnal International Advanced Manufacturing Technology (*under review*), dengan judul paper adalah "AnExperimental Investigation of Effects of Tool Rotational Speed on Chip Deformation during Turning with Actively Driven Rotary Tool"



International Journal of Advanced Manufacturing Technology
An Experimental Investigation of Effects of Tool Rotational Speed on Chip Deformation
during Turning with Actively Driven Rotary Tool
--Manuscript Draft--

Manuscript Number:	JAMT-D-14-01036
Full Title:	An Experimental Investigation of Effects of Tool Rotational Speed on Chip Deformation during Turning with Actively Driven Rotary Tool
Article Type:	Original Research
Keywords:	Turning with actively driven rotary tool, Tool rotational speed, Chip formation, Cutting forces, and Surface roughness
Corresponding Author:	Suryadiwansa Harun, Dr. University of Lampung Bandar Lampung, Lampung INDONESIA
Corresponding Author Secondary Information:	
Corresponding Author's Institution:	University of Lampung
Corresponding Author's Secondary Institution:	
First Author:	Suryadiwansa Harun, Dr.
First Author Secondary Information:	
Order of Authors:	Suryadiwansa Harun, Dr. Toshiroh Shibasaka, Dr.
Order of Authors Secondary Information:	
Abstract:	<p>This paper presents an experimental investigation on chip deformation during the actual turning with actively driven rotary tool. The main purpose of the present work is to make clearly the effect of tool rotational speed upon the chip formation, the cutting force components, and the surface roughness. In order to investigate the effect of tool rotation with a wide range of speed, the cutting tool is driven by the high speed motor of the main spindle machine and its rotation is controlled by NC Programmable. The components of cutting force were measured using the piezoelectric force transducers of the force ring dynamometer. The surface roughness value was obtained by measuring the surface roughness profile using a Mitutoyo Surface Roughness Tester. The experimental results showed that the tool rotational speed has a significant effect on the cutting forces. The resultant and tangential cutting forces were decreased with increasing the tool rotational speed to a certain value and then constant. The resultant cutting force of rotary tool was found to be smaller, which is approximately 18% lower than that of the tool not rotated. The axial force was increased with an increase in tool rotational speed in a certain speed range and then constant. Interestingly, the constant of cutting forces along with the increase of the tool rotational speed was obtained at the dynamic inclination angle is higher than 45deg. or the velocity ratio is higher than 1. The surface roughness value could be reduced by increasing the tool rotational speed in both the tool rotation direction of clockwise and counterclockwise. However, a decreasing trend of the surface roughness value based on the increase of tool rotational speeds is limited by the rigidity of the tool holder system.</p>
Suggested Reviewers:	<p>Shreyes Melkote, Ph.D. Professor, Georgia Institute of Technology smelkote@gatech.edu An expert in the field of turning with rotary tool</p> <p>Atsushi Matsubara, Dr Professor, Kyoto University, Japan matsubaraprec@kyoto-u.ac.jp An expert in the field of machining and measurement.</p>

Cover Letter

An Experimental Investigation of Effects of Tool Rotational Speed on Chip Deformation during Turning with Actively Driven Rotary Tool

My researches about the turning with actively driven rotary tool have mainly contribution to the metal cutting or machining field. The lowering of cutting temperature, the cutting force and the surface roughness obtained on the turning with rotary tool is the main reason why this technology has potential to apply for high speed cutting. The advantages of high speed cutting are high productivity and lower cost. In addition, this technology can be devoted this cutting method for high speed cutting of difficult-to-cut materials such as nickel based and titanium based alloys

One of the possible novel methods to decrease the cutting temperature as well as to increase the machining productivity is to use a rotary cutting tool in turning. This method is characterized by the cutting tool rotates in which its cutting edge is cooled during the non-cutting time in one rotation of the tool. It is indicated that the participation of the rotary tool motion in turning is the essential reason for the lowered cutting temperature as compared to that of turning by the non-rotating tool. This paper reported that the tool rotational speed has a significant effect on the cutting forces. The resultant and tangential cutting forces were decreased with increasing the tool rotational speed to a certain value and then constant. The resultant cutting force of rotary tool was found to be smaller, which is approximately 18% lower than that of the tool not rotated. The axial force was increased with an increase in tool rotational speed in a certain speed range and then constant. Interestingly, the constant of cutting forces along with the increase of the tool rotational speed was obtained at the dynamic inclination angle is higher than 45deg. or the velocity ratio is higher than 1. The surface roughness value could be reduced by increasing the tool rotational speed in both the tool rotation direction of clockwise and counterclockwise. It is importantly noted that the results as mentioned above were not reported by the past researchers.

The results of this paper can be contributed to the industry field such as the Machine Tool Manufacturer and the Metal Cutting Application. In the machine tool manufacturer, this results can be used to design the rotary turning tool holder system for the multi axes machine tool. Also, it can be used for machining of difficult to cut material, which is widely using in aerospace, turbine, and biomedical applications.

An Experimental Investigation of Effects of Tool Rotational Speed on Chip Deformation during Turning with Actively Driven Rotary Tool

Suryadiwansa Harun^{1*}, Toshiroh Shibasaka²

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Lampung, Indonesia

²Graduate School of Engineering, Kobe University, Kobe, Japan

Abstract: This paper presents an experimental investigation on chip deformation during the actual turning with actively driven rotary tool. The main purpose of the present work is to make clearly the effect of tool rotational speed upon the chip formation, the cutting force components, and the surface roughness. In order to investigate the effect of tool rotation with a wide range of speed, the cutting tool is driven by the high speed motor of the main spindle machine and its rotation is controlled by NC Programmable. The components of cutting force were measured using the piezoelectric force transducers of the force ring dynamometer. The surface roughness value was obtained by measuring the surface roughness profile using a Mitutoyo Surface Roughness Tester. The experimental results showed that the tool rotational speed has a significant effect on the cutting forces. The resultant and tangential cutting forces were decreased with increasing the tool rotational speed to a certain value and then constant. The resultant cutting force of rotary tool was found to be smaller, which is approximately 18% lower than that of the tool not rotated. The axial force was increased with an increase in tool rotational speed in a certain speed range and then constant. Interestingly, the constant of cutting forces along with the increase of the tool rotational speed was obtained at the dynamic inclination angle is higher than 45deg. or the velocity ratio is higher than 1. The surface roughness value could be reduced by increasing the tool rotational speed in both the tool rotation direction of clockwise and counterclockwise. However, a decreasing trend of the surface roughness value based on the increase of tool rotational speeds is limited by the rigidity of the tool holder system.

Keywords: Turning with actively driven rotary tool, Tool rotational speed, Chip formation, Cutting forces, and Surface roughness.

1. Introduction

High speed cutting has become one of the most promising advanced manufacturing technologies in recent years. The advantages of high speed cutting are high productivity and lower cost. However, as a consequence of high speed cutting, the cutting temperature rises and the life of cutting tool is shortened. Many researches have been carried out to seek for effective methods to overcome the cutting temperature rise when high speed cutting is applied. One of the possible novel methods to decrease the cutting temperature as well as to increase the machining productivity is to use a rotary cutting tool in turning [1]. This method is characterized by the cutting tool rotates in which its cutting edge is cooled during the non-cutting time in one rotation of the tool. It is indicated that the participation of the rotary tool motion in turning is the essential reason for the lowered cutting temperature as compared to that of turning by the non-rotating tool. Harun et al. [2] have been confirmed this indication with carrying out an experimental investigation on the turning with actively driven rotary tool, which is reporting that the minimum temperature recorded by tool rotation is approximately 150°C lower than that the cutting with a non-rotating tool. Dessoly et al. [3] have also been confirmed that the turning with self-propelled rotary tool provides lower cutting temperatures (by 50°C) compared to that obtained with a conventional non-rotating circular tool under identical cutting conditions. The lowering of cutting temperature obtained on the turning with rotary tool is the main reason why some researchers have been devoted this cutting method for high speed cutting of difficult-to-cut materials such as nickel based and titanium based alloys [4, 5]. However, the state of the art of cutting with rotary tools in turning is still at a pre - matured stage, and it requires systematic researches before applying the technology to actual production.

*Corresponding author. Tel.: +62-721-3555519; fax: +62-721-704947. E-mail addresses: suryadiwansa.harun@eng.unila.ac.id (S. Harun)

The effect of tool rotation of the turning with driven rotary tool is interesting to be studied due to its potential to improve the machining performance. Some researchers have tried to study the effect of tool rotation of the turning with actively driven rotary tool mainly on the cutting force and the cutting temperature. Their studies are classified into two principles of turning operation, the end face cutting [1] and the straight cutting [2, 4]. Shaw et al. [1] tried to study experimentally the effect of tool rotary motion on cutting forces during the end face turning with driven rotary cutting tool. However, in case of the principle of end face turning, the obtained cutting forces seem to be different as compared to that of the principle of straight turning. Lei et al. [4] have been trying to investigate experimentally the effect of tool rotary motion on the cutting force of turning with driven rotary tool based on the principle of straight turning. It was reported that the cutting forces decreases slightly with the increase of rotation speed with a speed range from 0.54 to 23m/min or a velocity ratio range from 0 to 0.1. However, this study has indicated that the effect of tool rotation on the cutting force in a velocity ratio higher than 0.1 is not clear yet. In contrast with previous researches, Harun et al. [2] have been investigating the effect of tool rotation within a wide speed range of the cutting temperature during the straight turning with actively driven rotary tool. It was found that the tool rotational speed has a significant effect on the cutting temperature. The cutting temperature decreases along with the increase of the tool rotational speed to a minimum value at a certain speed range and then increase. The minimum temperature obtained at the dynamic inclination angle was about 18deg. or in a velocity ratio of 0.3, which was approximately 150°C lower than the temperature recorded by the cutting with a non-rotating tool

This paper presents an experimental investigation on chip deformation of the actual turning with actively driven rotary tool. The main purpose of the present work is to make clearly the effect of tool rotational speed upon the cutting force components, the chip formation, and the surface roughness. In order to investigate the effect of tool rotation with a wide range of speed, the cutting tool is driven by the high speed motor of the main spindle machine and its rotation is controlled by NC Programmable.

2. A feature of turning with actively driven rotary tool

Figure 1 shows the basic feature of the turning with actively driven rotary tool process used in this work. Geometrically, this method is characterized by the circular cutting edge, the normal rake angle and the clearance angle. In addition, it is possible to have two positions of the tool cutting edge relative to the workpiece. The inclination angle i of the tool holder and offset height h (offset angle θ) are defined in Fig. 1. Cinematically, three motions are involved in this method: (1) Cutting motion, cutting velocity of workpiece V_w ; (2) Feed rate of the tool f into the workpiece, and (3) The tool rotation speed V_T as the main feature in this method, which causes sidewise motion of the tool. It is assumed that when the tool rotates from point of large chip thickness to the point of small chip thickness, the rotational direction of the tool is defined to be counterclockwise. In addition, the incline angle (that's called as the dynamic inclination angle i_d) of the resultant vector of both cutting velocities of workpiece and tool rotational speed was also formed, which it can be expressed as shown in Eq. 1. The increase of the tool rotational speed can lead an increase in the dynamic inclination angle. This causes the change of chip flow direction [1] so that the cutting mechanics change from orthogonal to oblique cutting.

$$\tan i_d = \frac{V_T}{V_w \cdot \cos \theta \cdot \cos i} \quad (1)$$

3. Experimental procedure

3.1 Experimental Equipment and Condition

Figure 2 shows a photograph of the experimental equipment. In order to measure the cutting force in this equipment, an additional spindle is mounted on the table on a vertical machining center (Hitachi Seiki VM-3) to which the workpiece is attached as shown in Fig. 2. A 16 mm diameter insert tool made of PVD Coated Cermet having a normal rake angle of 11° was used. The insert tool was clamped on the special tool adapter, and then they were fixed on the milling spindle, which is its rotation changed easily and elevated by the programmable control. The work materials employed for the cutting experiment were plain carbon steel JIS:S45C, which were finished prior to the cutting test in the form of solid bar of 50mm diameter and 120mm length. The major cutting conditions are summarized in Table 1.

3.2 Cutting force and surface roughness measurement

Cutting forces were measured using the piezoelectric force transducers of the force ring dynamometer. Figure 3.a shows a schematic illustration of the cutting force measurement system in turning with the rotary cutting tool. There are three components of the cutting forces, consist of the tangential force, F_z , which acts in the tangential direction of the rotating workpiece. The axial force, F_x is a longitudinal force component acting in the direction parallel to the axis of the workpiece rotation. The radial force, F_y is acting in the radial direction of the workpiece from the center of rotation. The force ring is composed of eight piezoelectric force sensors embedded in a ring like frame, which is installed at the fixing point of the main spindle head. In order to record the output of cutting force signal from these sensors, they should be sent to change amplifiers prior they recorded by using the digital oscilloscope. In order to get an accurate measurement of the cutting force components, calibration of the dynamometer was carried out prior to the cutting tests to calibrate the sensitivities of the dynamometer with the use of the table-type dynamometer and also the cross talks of the output signals was compensated [6]. Fig. 3.b shows a schematic illustration the surface roughness measurement. The surface roughness value of machined workpiece is obtained by measuring the surface roughness profile using a Mitutoyo Surface Roughness Tester. The surface roughness value was calculated in two terms, consist of the maximum height of the roughness profile (R_z) and the arithmetic average of the roughness profile (R_a).

4. Experimental result and discussion

4.1 Chip formation

Figure 4 shows the photograph of chips obtained during machining with various tool rotational speeds and in either direction of the clockwise (CW) and the counterclockwise (CCW). In case of the tool was rotated in CW direction, see Fig. 4.a, with increasing the tool rotational speed, the helix angle of chips and the pitch of chips were increased, and then it seems that the chip flow becomes smooth, also its flow direction was changed. This indicates the cutting mechanics change from the orthogonal to the oblique cutting.

Interestingly, the chip produced during machining when the tool was rotated in CCW is somewhat different as compared to that of the opposite direction as shown in Fig. 4.b. As observed in this figure, it was rather broken, especially at the lower tool speeds (3 and 5m/min). It is further observed that its helix angle and its pitch were smaller as compared to that of the tool rotating in the opposite direction. This caused by the chip stacked on the workpiece surface so that the chip flow becomes not smooth.

4.2 Effects of tool rotational speed and direction on the cutting force

Figure 5 shows the effect of the tool rotational speed on cutting forces when the tool was rotated in either direction of the clockwise (CW) and the counterclockwise (CCW). In case of the cutting speed V_w of 60m/min, see Fig. 5.a, the tangential cutting force that obtained at low tool rotational speed in a speed range until approximately 20m/min was higher than that of the tool not rotated. Then, the higher of the tangential force decreases with increasing the tool rotational speed in either tool rotation direction of CCW and CW. This can be attributed to the reduced amount of work done during chip deformation of turning with actively driven rotary tool. According to Eq.1, the increase of tool rotational speed can lead an increase in the dynamic inclination angle so that causes the helix angle and the chip pitch increased. This indicates an increase in chip flow angle, and then leads the effective rake and shear angle was increased. These factors cause the cutting force decreases along with the increase of tool rotational speed. Interestingly, the decrease of the tangential force with an increase in clockwise tool rotational speed was effective to a speed limit of approximately 100m/min or the velocity ratio is higher than 1 (calculated from Eq.1) and then constant. It means that the decrease of that cutting force based on the increase of tool rotational speed already reaches the saturation state. In other word, the effect of effective rake and shear angle to decrease the cutting force was limited by the increase of tool speed cutting.

In contrast to those cutting forces, the axial force increases with an increase in clockwise tool rotational speed and then constant as shown in Fig. 5.a. When the tool is rotated in CW direction, the tangential velocity of the tool has the same direction with feed direction. That results cause the large axial vector

velocity, which is the sum of the tangential velocity of the tool and feed speed. This factor increases the axial force component with an increase in the tool rotational speed. However, the change of axial force with increasing the tool rotational speed was almost constant in a speed range is higher than approximately 60m/min, which is the equal to the dynamic inclination angle of 45deg (case of $V_w=60\text{m/min}$) or the velocity ratio of 1 as calculated from Eq.1. When the tool rotational speed is higher than the cutting speed V_w (the dynamic inclination angle is higher than 45deg.), the chip will slide on the rake face of the tool. It is seemed that the sticking region at the chip - tool interface is eliminated, and this tends to reduce the frictional drag. The drop in the frictional drag was invoked to explain the observed constant change in the magnitude axial cutting force at the velocity ratio range is higher than 1.

The radial force decreases slightly as increasing tool rotational speed in the clockwise tool rotation direction, while it was almost constant as increasing tool rotational speed in the opposite direction. As consequence of magnitude all cutting force components, the resultant cutting force also decreases along with the increase of tool rotational speed in experimental range of the tool rotational speed. In addition, the resultant cutting force of rotary tool was found to be smaller, which is approximately 18% lower than the resultant cutting force recorded by the non-rotating tool. The similar trend was also observed in the case of the cutting speed was changed from 60 to 80m/min as shown in Fig. 5.b. It is importantly noted that the results as mentioned above were not reported by the past researchers.

4.3 Effects of tool rotational speed on the surface roughness

Figure 6 shows the variation of surface roughness value and surface roughness profile when the tool was not rotated (tool rotational speed of 0 min^{-1}) and rotated in a clockwise (CW) direction under the cutting condition consists of the cutting speed of 160m/min, the feeding of 0.1mm/rev, and the depth of cut of 0.5mm. As shown in this figure, it is obvious that the surface roughness value in both terms the maximum height of roughness profile, R_z and the arithmetic average of roughness profile, R_a of a case of the non-rotating tool (tool rotational speed of 0 min^{-1}) were smaller as compared in case of tool rotated at both speeds of 100 and 300 min^{-1} . Interestingly, the surface roughness value in both terms R_z and R_a decreases to a minimum value of 5.613 and $0.873\mu\text{m}$, respectively, when tool rotational speed was increased from 100 to 700 min^{-1} . Another case when tool rotated in the direction of counterclockwise under the depth of cut was changed to 1mm, see Fig. 7. The minimum of surface roughness value in both types R_z and R_a were obtained at tool rotational speed of 700 min^{-1} , in which their value are 8.156 and $1.127\mu\text{m}$, respectively. The Similar trend was also obtained in case of the effects of the tool rotational speed on the surface roughness value under the cutting condition of the feeding of 0.143mm/rev and the cutting speed of 100m/min as shown in Fig.8.

It is described in section 4.2 that the tangential cutting force at low tool rotational speed were relatively higher than the non-rotating tools. Beside that, it seems that the uneven depth of cut in one rotation of the tool due to mainly by the run out (eccentricity) of the rotary cutting tool is possibly occurring. It causes the surface roughness value in case of tool rotated is larger than that in case of non-rotating tool. The higher tangential forces at low tool rotational speed was gradually decreased along with the increase of tool rotational speed. Therefore, the surface roughness value decreases along with increasing the tool rotational speed from 100 to 700 min^{-1} . However, the surface roughness value in the case of the tool rotational speed of more than 700 min^{-1} was large. It seems that the tool holder may be vibrate due to insufficient rigidity when the large axial force occurred at increasing clockwise tool rotational speed.

5. Conclusion

In this paper, an experimental examination of the effects of the tool rotational speed and direction upon the chip formation, the cutting forces, and the surface roughness during turning with the actively driven rotary tools were carried out. The following remarks are concluded in this paper from the experiments.

1. The increase of the tool rotational speed can lead an increase in the dynamic inclination angle so that causes the helix angle and the pitch of chips were increased.
2. The tool rotational speed has a significant effect on the cutting forces. The resultant and tangential cutting forces decrease with increasing the tool rotational speed to a certain value and then

constant. The resultant cutting force of rotary tool was approximately 18% lower than the resultant cutting force recorded by the cutting with a non-rotating tool.

3. The axial force increases with an increase in tool rotational speed in a certain speed range and then constant.
4. Interestingly, the constant of the cutting forces along with the increase of the tool rotational speed was obtained at the dynamic inclination angle higher than 45deg. or the velocity ratio higher than 1.
5. However, the radial force decreases slightly as increasing tool rotational speed in the clockwise tool rotation direction, while it was almost constant as increasing tool rotational speed in the opposite direction.
6. The surface roughness value could be reduced by increasing the tool rotational speed both in tool rotation direction of clockwise and counterclockwise. However, a decreasing trend of the surface roughness value based on the increase of tool rotational speeds is limited by the rigidity of the tool holder system.

Acknowledgement

The Experiment, presented in this paper is done in the Lab. CIM Kobe University in the framework of a cooperative research project "The Turning Spinning Tool" with Mori Seiki Co., Ltd. I would like to thank Prof. Toshimichi Moriwaki, K. Okura and Gregory Hyatt, who contributed to the success of this research project. Also the authors would like to thank for the Direktorat Litabmas DIKTI for their financial support under 582/UN26/8/PL/2013 Grants.

6. References

- [1] Shaw MC, Smith PA, Cook NH (1952) the Rotary Cutting Tool. Transactions of the ASME 74:1065-1076.
- [2] Harun S, Shibasaki T, Moriwaki T (2008) Cutting Temperature Measurement in Turning with Actively Driven Rotary Tool. Key Engineering Materials 138:389-390.
- [3] Dessoly V, Melkote SN, Lescallier C (2004) Modeling and verification of cutting tool temperatures in rotary tool turning of hardened steel. International Journal of Machine Tools and Manufacture 44(14):1463-1470.
- [4] Lei S, Liu W (2002) High-speed Machining of Titanium Alloys Using the Driven Rotary Tool. International Journal of Machine Tools and Manufacture 42:653-661.
- [5] Sasahara H, Satake K, Nakajima H, Yamamoto H, Muraki T, Tsutsumi M (2008) High-Speed Rotary Cutting of Difficult to Cut Materials on Multi Tasking Lathe. International Journal of Machine Tools and Manufacture 48:841-850.
- [6] Harun S, Shibasaki T, Moriwaki T (2008) Cutting Mechanics of Turning with Actively Driven Rotary Tool. The Journal of Advanced Mechanical Design, System, and Manufacturing 2(4):579-586.

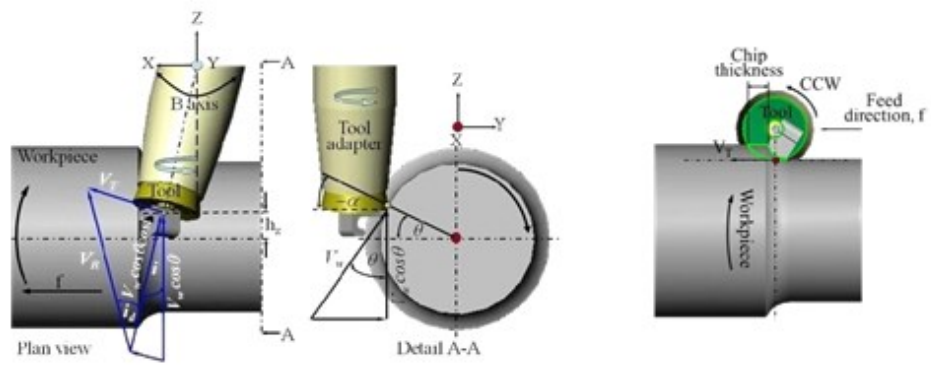
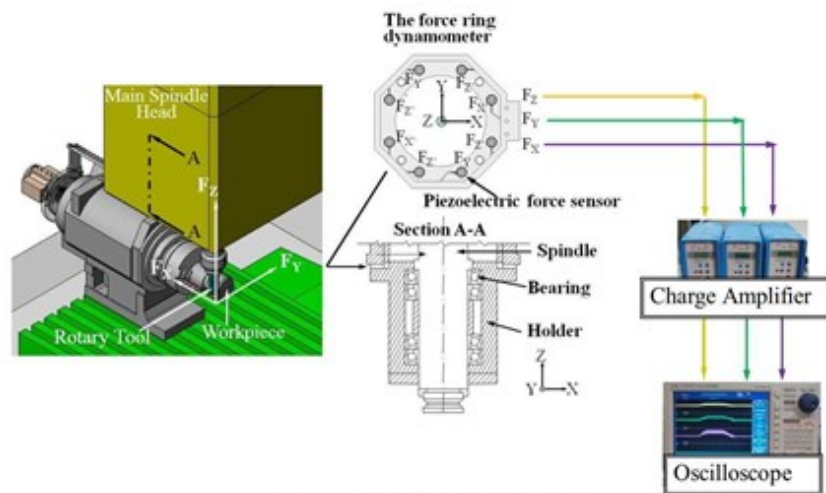


Fig. 1. Principle of turning with actively driven rotary tool [6]



Fig. 2 Photograph of experimental equipment of the vertical machine center



a. Cutting force measurement

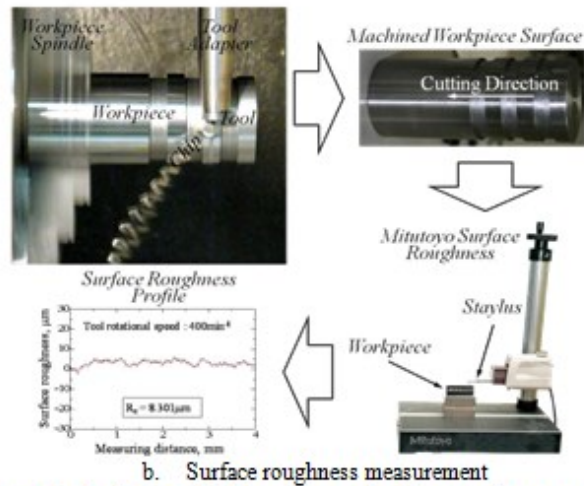


Fig. 3 Schematic illustration of cutting force and surface roughness measurement

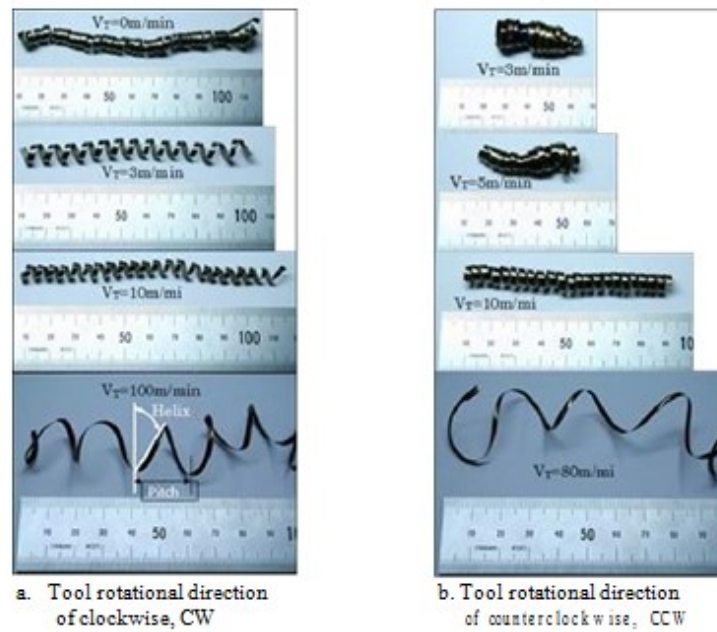
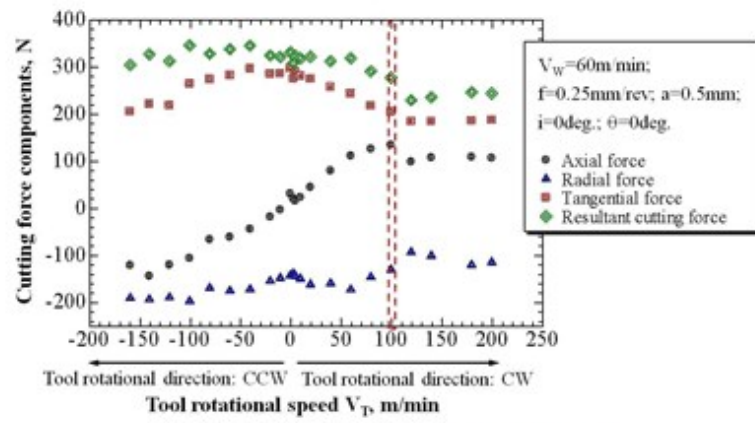
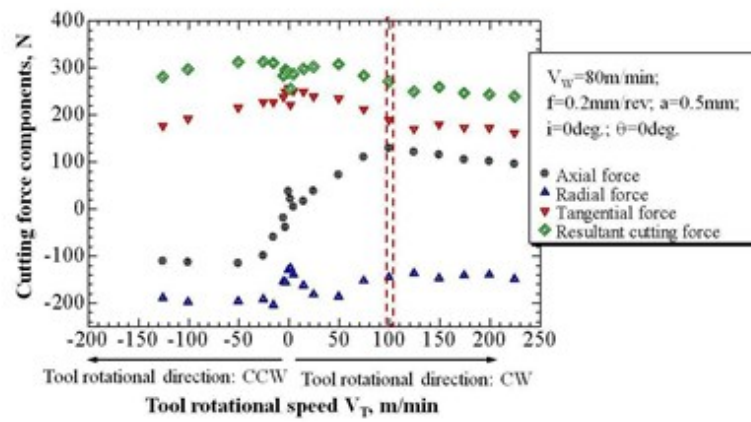


Fig. 4 Photographs of chip obtained during machining with various tool rotational speed (cutting conditions: $V_w=60\text{m/min}$; $a=0.5\text{mm}$; $i=0\text{deg.}$; $\phi=0\text{deg.}$)



a. In case of cutting speed of 60m/min



b. In case of cutting speed of 80m/min Fig.

5 Effect of tool rotational speed on cutting forces

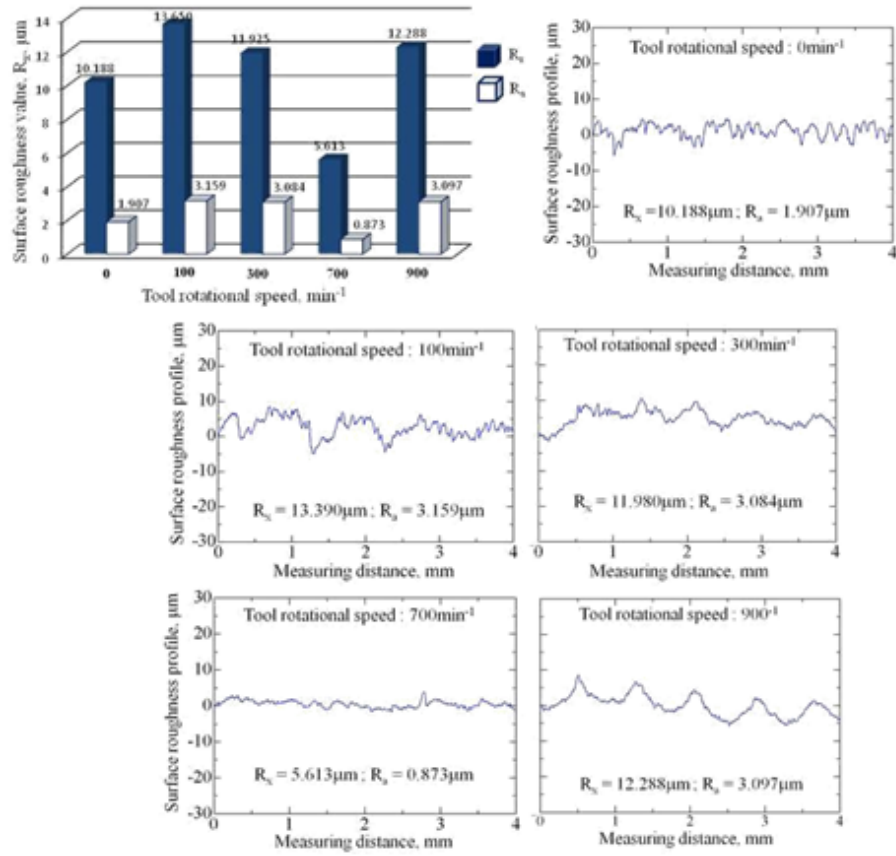


Fig 6. Effects of tool rotational speed on surface roughness value during rotary turning with cutting condition: $V_W=160 \text{ m/min}$, $f=0.1 \text{ mm/rev}$, $a=0.5 \text{ mm}$, $i=0 \text{ deg.}$, tool rotation direction=CW

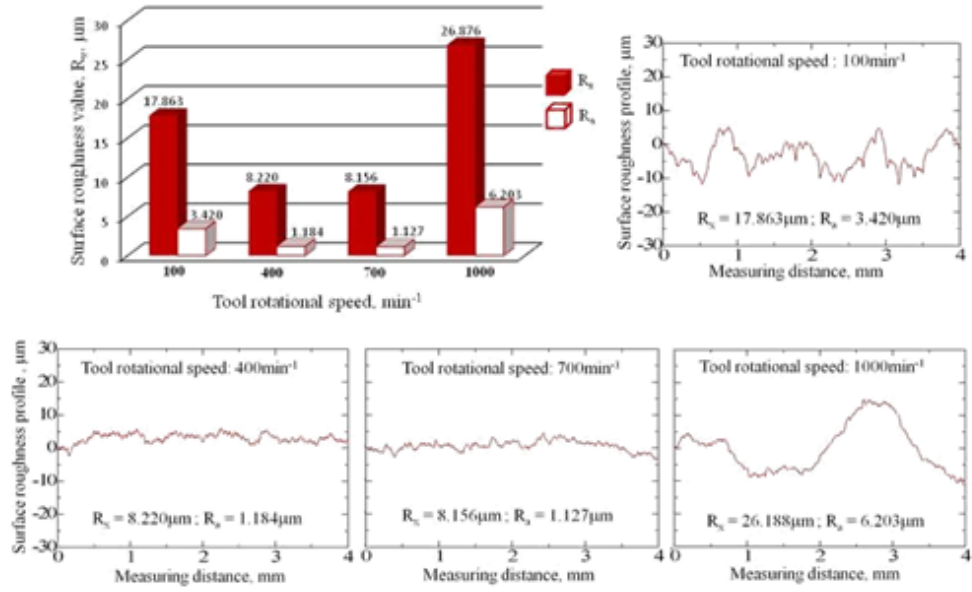


Fig 7.Effects of tool rotational speed on surface roughness value during rotary turning with cutting condition: $V_W=160 \text{ m/min}$, $f=0.1\text{mm/rev}$, $a=1 \text{ mm}$, $i=0 \text{ deg.}$, tool rotation direction=CCW

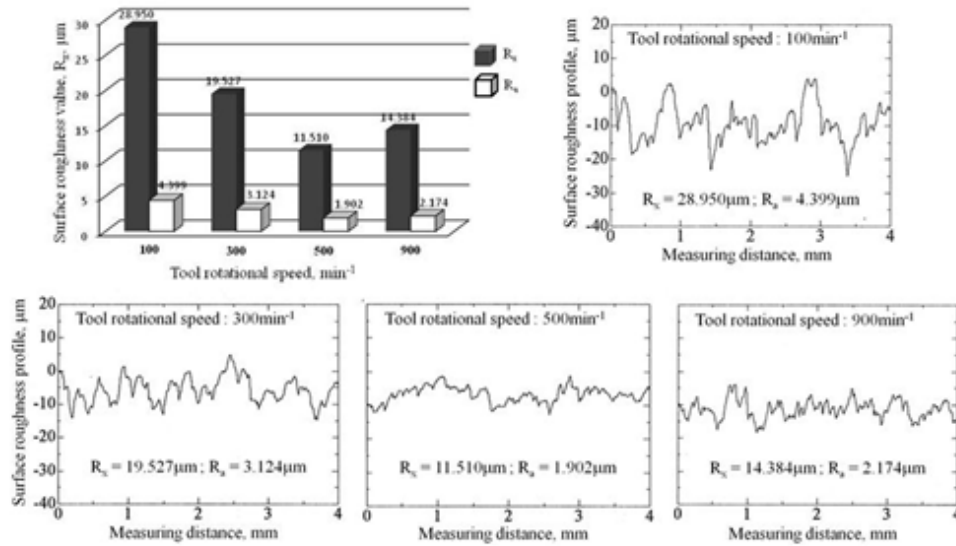


Fig 8.Effects of tool rotational speed on surface roughness value during rotary turning with cutting condition: $V_W=100 \text{ m/min}$, $f=0.143\text{mm/rev}$, $a=0.5 \text{ mm}$, $i=0 \text{ deg.}$, tool rotation direction=CCW

Table 1 Major cutting condition

Work material	Plain Carbon Steel (JIS:S45C) Diameter=50mm
Tool	Type: RPMT 1604 MO-BB (Kyocera) Material: PVD Coated Cermet Geometry: Normal rake and relief angle $\alpha=11^\circ$, Diameter D=16 mm
Tool rotational speed N_T, min^{-1}	0 ~ ± 4000
Work speed $V_W, \text{m/min}$	60 ~ 160
Feed $f, \text{mm/rev}$	0.1 ~ 0.25
Depth of cut a, mm	0.5; 1
Inclination angle $i, \text{deg.}$	0
Offset angle $\theta, \text{deg.}$	0
Cutting fluid	Dry
Direction of the spindle rotation	Tool spindle: CW; CCW

Lampiran 2: Draft Paper yang dipilih (*selected paper*) dari Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII (SNTTM XIII) Sesi Internasional yang akan dimasukkan (submitted) pada Jurnal **Key Engineering Materials / Applied Mechanics and Materials (AMM)** by Trans Tech Publications



"Kontribusi untuk Masyarakat"

Latar Belakang
Perguruan Tinggi merupakan institusi pendidikan Tertinggi, mengemban tanggung jawab yang besar. Tanggung jawab ini tertuang pada konsep Tri Dharma Perguruan Tinggi yang terdiri dari Pendidikan dan Pengajaran; Penelitian dan Pengembangan; serta Pengabdian pada Masyarakat. Kesejahteraan masyarakat, perkembangan ekonomi, dan kemajuan teknologi akan terlihat-membanggakan dengan baiknyanya realisasi dari konsep tersebut.

Bertanya tugas dan tanggung jawab yang diemban oleh perguruan tinggi tentu akan terasa ringan jika tugas dan tanggung jawab tersebut dihadapi bersama. Oleh karena itu, dalam rangka mempercepat kemajuan teknologi dan penelitian di dalam bidang Teknik mesin, didirikanlah Badan Kerja Sama Teknik Mesin (BKSTM) pada pertemuan ketua jurusan/program studi/departemen Teknik Mesin se-Indonesia pada tanggal 29 Mei 2002 di Jurusan Teknik Mesin ITS. Anggota BKSTM adalah lembaga pendidikan tinggi yang menyelenggarakan pendidikan teknik mesin atau sejenis.

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin merupakan salah satu acara tahunan yang diwadahi oleh BKSTM. Acara ini diselenggarakan dalam rangka menjangkau Komunikasi ilmu, riset, dan teknologi antara akademisi di Indonesia yang belajar/berkarir di bidang teknik mesin. Dengan demikian, tanggung jawab pendidikan penelitian, dan pengembangan dari Tri Dharma Perguruan Tinggi dapat diemban secara gotong royong oleh seluruh sivitas perguruan tinggi di Indonesia.

Format Extended Abstract
Extended abstract ditulis dalam bahasa Indonesia atau Inggris dengan menggunakan tipe huruf Times New Roman berukuran 12 point. Spasi baris kata pada paragraf adalah 1.0 poin. *Extended abstract* ditulis pada kertas berukuran A4 dan tidak lebih dari dua halaman. Isi dari *Extended Abstract* meliputi Abstrak, Latar Belakang, Metodologi, hasil dan kesimpulan secara ringkas, serta literatur. Penerimaan *Extended Abstract* didasarkan kepada kualitas dan orisinalitas di dalam ruang lingkup Teknik Mesin dan aplikasinya. Format penulisan *Extended Abstract* dapat diunduh di website resmi SNTTM XIII : <http://snttm-eng.ui.ac.id>

Format Makalah
Makalah merupakan versi mendetail dari *Extended Abstract* dan ditulis dalam bahasa Indonesia atau bahasa Inggris, maksimal 10 halaman. Makalah ditulis dengan tipe huruf Times New Roman ukuran 12 dan spasi baris kata 1.0 point. Makalah lengkap meliputi Abstrak, pendahuluan/latar belakang, metodologi, hasil, kesimpulan, dan daftar referensi. Format penulisan makalah lengkap dapat diunduh di website resmi SNTTM XIII : <http://snttm-eng.ui.ac.id>

Biaya Seminar

Peserta	Pendaftaran Tahap I	Pendaftaran Tahap II
Pihak Industri dan BUMN	700000	750000
Dosen	500000	600000
Mahasiswa	450000	500000
Sesi Internasional	250 USD	

Ketentuan :
 *)Biaya pendaftaran sudah termasuk Seminar Kit, Buku Program, Makan Siang, Gala Dinner, dan Coffee Break, serta acara Tur (peserta terbatas).
 *)Maksimal halaman makalah lengkap adalah 10 halaman
 *)Peserta yang mengirimkan lebih dari satu artikel akan dikenakan biaya tambahan 50% untuk paper kedua dan seterusnya.

Publikasi
Naskah terpilih pada sesi internasional akan dipublikasikan pada Prosiding Konferensi Internasional : **Applied Mechanics and Materials**
Trans Tech Publication

Topik Seminar

- Manufaktur
- Konversi Energi
- Mekanika Terapan
- Material
- Teknologi Perkapalan
- Pendidikan Teknik Mesin

Pendaftaran

Calon peserta dapat mendaftarkan diri melalui website resmi SNTTM XIII : <http://snttm-eng.ui.ac.id>.
 Calon peserta yang ingin mengajukan makalah dapat mengunggah *Extended Abstract* di tautan berikut : <https://www.easychair.org/conferences/pecon-f-snttm13>.
 Setelah melalui proses seleksi dan dinyatakan naskah ilmiah diterima, calon peserta dapat melakukan pembayaran sesuai dengan biaya yang telah ditentukan.

Lomba Nasional Tahunan Rancang Bangun Mesin IV*

Topik
"Alat bantu kesehatan untuk penyandang cacat fisik"

Hadiah Lomba
 - 20.000.000 IDR (Pemegang 1)
 - 10.000.000 IDR (Pemegang 2)
 - 5.000.000 IDR (Pemegang 3)
 - 2.500.000 IDR (Pemegang Harapan 1)
 - 2.500.000 IDR (Pemegang Harapan 2)

Jadwal kegiatan lomba :
 11 Agustus 2014
 Batas akhir penyerahan materi
 12 Agustus - 12 September 2014
 Penilaian tahap 1, Desk Evaluation
 15 September 2014
 Pengumuman hasil Desk Evaluation
 16 September - 7 Oktober 2014
 Perbaikan materi presentasi
 15 Oktober 2014
 Presentasi dan pengumuman pemenang
 16 Oktober 2014
 Penyerahan hadiah

* Lomba tidak dipungut biaya.
 *) Syarat dan ketentuan serta informasi lainnya dapat di peroleh dengan menghubungi panitia atau dengan mengunjungi website resmi SNTTM XIII : <http://snttm-eng.ui.ac.id>

FEM Simulation of Machining AISI 1045 Steel Using Driven Rotary Tool

Keyword: driven rotary tool, tool rotational speed, force, temperature

Abstract. This study investigates the influences of driven rotary tool (DRT) on temperatures and forces when turning AISI 1045 steel. A set of cutting conditions was used in FE simulations to predict cutting force, stresses and temperatures developed at around the edge of tool. The material cutting speed ranges were set between 20 and 250 m min⁻¹. The rotary tool speed were 0 and 100 rpm. The feed rate and the depth of cut were set constant. Simulation results provided the predicted cutting distribution of temperatures and stresses at the chip and work piece.

Introduction

Machining of high strength steel using conventional cutting is very difficult and time consuming. During machining takes place, temperature and pressure will arise, this will lead to hardening due to the deformation or phase change of the materials. Therefore, instead of using conventional cutting tool, machining of high-strength steel using a driven rotary tool may provide a better solution.

Rotary tool turning is a cutting process in which the cutting edge of a round insert rotates its axis, so that a continuously indexed cutting edge is fed into the cutting zone [1]. There are two types of rotary tool, self-propelled rotary tool (SPRT) and driven rotary tool (DRT). The difference between these two types is an auxiliary drive unit to rotate the driven tool [2]. In SPRT, tool rotates due to the rotation of the workpiece while the DRT, the tool rotates due to driver motor. Self-rotation of a knife during machining process appears under influence of friction forces which appear in the point of contact of tool flank surface and machined surface. In the case of when angle $\alpha = 0^\circ$ then the knife during machining doesn't rotate but when angle $\alpha \neq 0^\circ$, a substantial contribution to self-rotation of knife has friction of a moving chip on the rake face [3].

In the rotary cutting tool, round inserts mounted on the tool holder will spin when engagement of the workpiece and the cutting tool. Because the rotary movement of the tool, the wear and heat will be distributed uniformly around the inserts. Uniform distribution of heat and wear at the cutting zone between the inserts and the workpiece will keep the temperature at an acceptable level. Thus hardening deformation or phase transformation can be avoided [1].

To obtain the characteristics of the rotary machining process, researchers require a lot of machining experiments. The vast machining experiments require a lot of cost and time. This gives an idea to the researchers to use finite element analysis. Investigators prefer the finite element analysis compared the experimental work because it can save time and costs [4].

Research of machining process simulation using rotary cutting tool is very rare. Until now none of literature on researches of rotary tool machining is reported. Most of the machining simulation researches are non-rotary tool machining simulation. There are many unknown phenomena in the rotary tool machining such as temperature distribution, tool wear, tool/workpiece stress and workpiece surface integrity. In this study a finite element is applied to simulate AISI 1045 steel machining using rotary tool. The aim of this study is to determine temperature distribution in the work-piece, tool and chip and cutting force in turning process. The model is based on unsteady state machining condition. AISI 1045 steel were turned under various cutting conditions. Various cutting conditions are cutting speed, feed rate, depth of cut and tool rotational speed.

Finite Element Modeling

The first step in finite element simulation of rotary tool machining is to establish the tool geometry. This geometry model including rake angle, relief angle and tool diameter as shown in Fig 1. The next step is to establish the finite element model of rotary tool turning. The finite element model of rotary tool is made based on the kinematic model of rotary turning. Kinematic and finite element model of rotary tool turning were illustrated in Fig 2a & b.

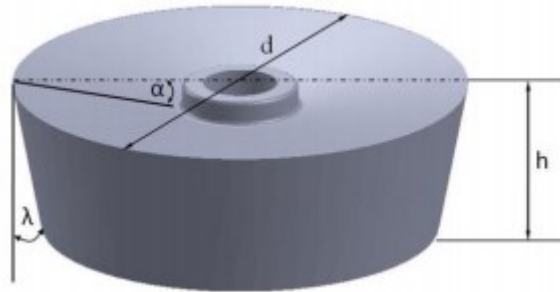


Fig 1. Tool geometry model (d =tool diameter, h =tool thickness, α =rake angle, λ =clearance angle)

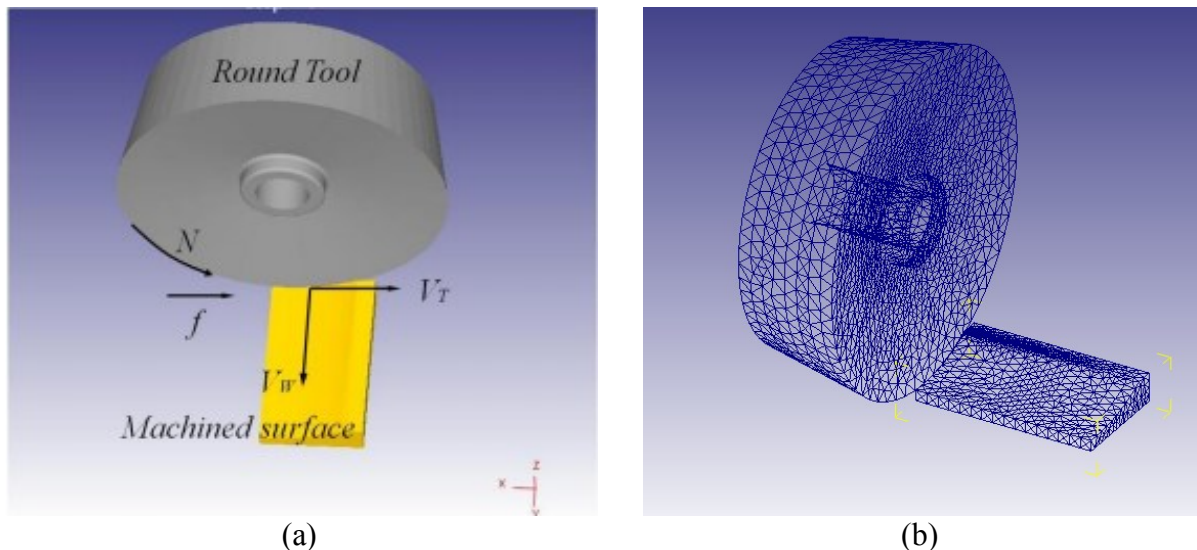


Figure 2 (a) Kinematic modeling of rotary tool, (b) Meshing of rotary tool turning

Finite elements of methode was used to simulate the metal cutting process. It is based on the Updated Lagrangian formulation. This software is used to simulate machining parameters in a turning process of AISI1045 carbon steel. Workpiece was assumed as plastic, whereas the tool was assumed as a rigid. The transfer of heat was taken into account to the modeling of cutting temperature.

Simulation process was done by varying the cutting speed, feed, depth of cut and tool rotation speed. The machining parameters is shown in Table 1, while the type and geometry of material and tool are shown in Table 2.

Table1. Machining parameters in simulation

Tool rotary speed N, Rpm	0 & 100
Workpiece cutting speed VW, m/min	60 ~160
Feed, mm/rev	0.1;0.2
Depth ofcuta, mm	0.5
Inclination angle, deg	0°

Offset angle θ , deg	0
-----------------------------	---

Table 2. Material type and cutting tool geometry

Workpiece	
Material type	Plain Carbon Steel (AISI 1045)
Material dimension	Diameter 50 mm
Round Tool Insert	
Material	Uncoated tungsten carbide, WC-Co
Geometry	Jenis RPMT 1604 MO-BB (Kyocera)
Relief angle	$\alpha=11^\circ$
Diameter	D=16 mm

The results of force and temperature on tool and workpiece would be analyzed. The initial temperature of the workpiece and the tool was set to 20°C. Simulation was carried out until achieved a steady state condition to allow the flow of heat into the workpiece, tool and chip. Results and values observed on the tool and workpiece would be taken into account after the complete simulation.

Result and Discussion

The results from the turning process simulation using rotary cutting tool were analyzed after the complete simulation. There are two aspects to be analyzed namely cutting temperature and cutting force. Of the total energy consumed in machining, nearly all of it (approximately 99%) is converted into heat[5]. The heat was distributed between three areas namely tool, workpiece and chip during the machining process. A significant proportion of the cutting energy is carried off with the chip hence the chip temperature usually higher than two other areas. The temperature distribution on the tool is illustrated in Fig 3a. The temperature distribution on the interface of the tool-workpiece is illustrated in Figure 3.b. While the temperature distribution on the chip where the largest temperature observed in this area is shown in Fig 3.c.

The results of the tool rotational speed effect on the machining temperature and cutting force are shown in Table 3 and Table 4. Table 3 contains the effect of tool rotational speed on the tool-workpiece interface temperature and chip temperature. Table 4 contains the effect of tool rotational speed on the main cutting force. In both tables it can be seen that the temperature and cutting force at lowest value when machining at tool rotational speed of 35 m/min. Therefore based on the value of tool cutting speed 35m/min, the prediction of the effect of workpiece cutting speed on the cutting force and chip temperature will be simulated.

Table 3 The effect of tool rotary speed variation to tool-workpiece interface and chip temperature (Machining condition: $V_w=150$ m/min, $f=0.2$ mm/rev, $a = 1$ mm, $i = 0$, $\theta = 0$, and dry)

No	Tool rotation speed		Cutting temperature	
	N, Rpm	VT, m/min	Tool-workpiece interface, °C	Chip, °C
1.	0	0	432	787
2.	50	2.5	384	755
3.	100	5.0	377	724

4.	200	10	371	708
5.	300	15	392	716
6.	500	25	389	711
7.	650	32.5	347	752
8.	700	35	332	737
9.	750	37.5	324	689
10.	800	40	371	742
11.	900	45	375	754
12.	1000	50	378	751
13.	1500	75	408	758
14.	2000	100	419	775
15.	2500	125	414	794
16.	3000	150	546	1070

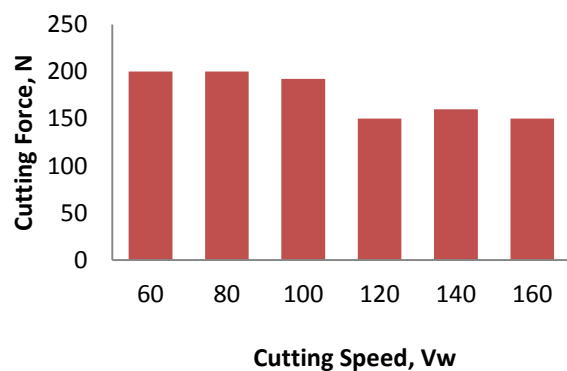
Table 4 The effect of workpiece cutting speed variation to main cutting force (Machining condition: $V_w=80$ m/min, $f=0.2$ mm/rev, $a = 0.5$ mm, $i = 0$, $\theta = 0$, and dry)

No	Tool rotation speed		Main cutting force F_y , N
	N, Rpm	VT, m/min	
1.	0	0	340,832
2.	100	5.0	367,820
3.	200	10	348,427
4.	300	15	364,161
5.	500	25	354,084
6.	600	30	300,202
7.	700	35	281,639
8.	800	40	284,986
9.	1000	50	290,242
10.	1500	75	283,339
11.	2000	100	272,194
12.	2500	125	226,195
13.	3000	150	232,926

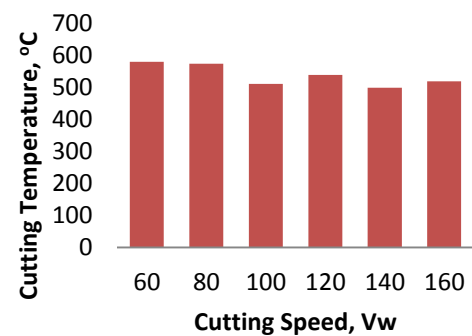
Table 5 and Fig. 4 show the result of workpiece cutting speed variation to main cutting force and chip temperature on the following machining condition: $V_T=35$ m/min, $f=0.1$ mm/rev, $a = 0.5$ mm, inclination angle = 0, $\theta = 0$, and dry. At the cutting tool speed of 35 m/min, the cutting force and cutting temperature decrease with the increasing of cutting speed. The cutting force decrease from 200 N to 150 N. Decrease in cutting forces according to experiments conducted by Lei & Liu[6] Decrease in cutting forces can be understood as the effect of thermal softening and reduced friction due to the increase in cutting speed. Thermal softening causes a decrease in strength of materials, the increase in friction angle and lower large plastic deformation[7]. But in this simulation cutting temperature decreases with increase in cutting speed. This is somewhat different from the usual obtained by other researchers. However, this temperature decrease is expected when going very rotating cutting tool wear in machining. Thus using a rotating cutting tool rotating at a speed of 35 m / min can be used.

Table 5 The effect of workpiece cutting speed variation to main cutting force and chip temperature (Machining condition: $V_T=35$ m/min, $f=0.1$ mm/rev, $a = 0.5$ mm, $i = 0$, $\theta = 0$, and dry)

No	Workpiece cutting speed V_w , m/min	Cutting force, N	Cutting temperature (chip), °C
1.	60	200	581
2.	80	200	575
3.	100	192	512
4.	120	150	540
5.	140	160	500
6.	160	150	520



(a)



(b)

Fig. 4 (a) Effect of cutting speed on cutting forces, (b) Effect of cutting speed on chip temperature

Conclusions

The conclusions of this work can be drawn as follows:

1. The cutting force and cutting temperature are in lowest value at the tool rotary of speed of 35 m/min.
2. The cutting force and cutting temperature will decrease with the cutting speed increasing at tool speed of 35 m/min.
3. To lower the temperature of the machining at high speed using driven rotary tool, then the speed of the recommended tool rotational speed is 35 m / min

Acknowledgement

The authors would like to thanks to The General Directorate of Higher Education, Indonesian Ministry of Education and Culture for sponsoring this work under Contract No. 582/UN26/8/PL/2013.

References

- [1] Shuting Lei and Wenjie Liu, "High-speed machining of titanium alloys using the driven rotary tool," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 42, pp. 653-661, 2002.
- [2] Tero Stenstoft, "Machining of some difficult-to-cut material with rotary cutting," The Royal Institut of Technology, KTH, Stockholm, Dissertation 2004.
- [3] Grzegorz Wieloch et al., "New Idea in construction and performance of turning rotary knife," *Annals of Warsaw University of Life Sciences*, vol. 72, pp. 433-437, 2010.

- [4] Ladislav Kandrak, Ildiko Mankova, Marek Vrabel, and Josef Beno, "Finite Element Simulation of Cutting Forces in Orthogonal Machining of Titanium Alloy Ti-6Al-4V," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 474, pp. 192-199, 2014.
- [5] Mikell P. Groover, *Fundamental of Modern Manufacturing Processes*. New Jersey: John Wiley and Sons, 2007.
- [6] S. Lei and W. Liu, "High-speed machining of titanium alloys using the driven rotary tool," *Int. Journal of Machine Tool & Manufacture*, vol. 42, pp. 653-661, 2002.
- [7] J.P. Davim and C. Maranhao, "A study of plastic strain and plastic strain rate in machining of steel AISI 1045 using FEM analysis," *Materials and Design*, vol. 30, pp. 160-165, 2009.

